

Angewandte Forschung für die Welt von morgen
Schriftenreihe der Hochschule Hannover (Band 1)

HOCHSCHULE
HANNOVER
UNIVERSITY OF
APPLIED SCIENCES
AND ARTS

Prof. Dr.-Ing. Ulrich Lüdersen, Prof. Dr.-Ing. Lars-Oliver Gusig (Hrsg.)

Energie – Mobilität – Prozesse

Schriften des Forschungsclusters EMP
2019

EMP 



Lüdersen, Ulrich; Gusig, Lars-Oliver (Hrsg.)
Energie – Mobilität – Prozesse : Schriften des Forschungsclusters EMP 2019
Hannover: Hochschule Hannover, 2020
(Angewandte Forschung für die Welt von morgen – Schriftenreihe der Hochschule Hannover; Band 1)

ISSN 2699-3384

DOI: <https://doi.org/10.25968/opus-1528>

URN: <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:960-opus4-15283>

Weitere Schriften aus der Reihe *Angewandte Forschung für die Welt von morgen – Schriftenreihe der Hochschule Hannover* finden Sie unter: **<https://serwiss.bib.hs-hannover.de/solrsearch/index/search/searchtype/series/id/12>**
Die Schriftenreihe *Angewandte Forschung für die Welt von morgen – Schriftenreihe der Hochschule Hannover* enthält Schriften zu ausgewählten Fragestellungen angewandter Forschung an der Hochschule Hannover.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über **<https://portal.dnb.de>** abrufbar.

Impressum

Hochschule Hannover
Präsident/in
Expo Plaza 4
30539 Hannover



Dieses Dokument ist lizenziert unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 (CC BY 4.0):
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Inhaltsverzeichnis

Vorwort der Forschungscluster-Sprecher

**Das Forschungscluster Energie, Mobilität, Prozesse:
Interdisziplinär vernetzt zu höherer Energieeffizienz**
(Lüdersen, Ulrich; Gusig, Lars-Oliver)

4

Grußwort Präsidium

(Bott, Oliver J.)

5

Beiträge

Status quo of urban logistics in science, politics and practice

(von Viebahn, Christoph; Auf der Landwehr, Marvin; Trott, Maik;
Gusig, Lars-Oliver)

7

Automation of Automation – Ein Ansatz für das Engineering von technischen Energiemanagementsystemen

(Würger, Andreas; Niemann, Karl-Heinz)

22

Ansätze zur Strömungsanalyse einer Rotationskompressions- kältemaschine

(Cui, Bin; Gottschlich, Martin; Lüdersen, Ulrich)

33

Effektivitätsnachweis bei der Entsäuerungs-Mengenbehandlung schriftlicher Kulturgüter

(Schmuck, Maren; Hondonzi, Saranda; Nadolny, Anne; Lüdersen,
Ulrich)

44

Urbane Mobilität – Klassifizierung von Stadtteilen für die Identifikation von Potentialen im städtischen Lieferverkehr

(Dünte, Jan; Fünfkirchler, Timo; Gusig, Lars-Oliver)

55

Akkubedingte Grenzen der Auslastung eines automatischen Pedelec-Vermietsystems

(Bedrunka, Alexander)

66

Methodik zur Reichweitenbestimmung von leichten Elektrofahrzeugen der Klassen L1e bis L6e mit einer Geschwindigkeit bis zu 45 km/h

(Novikov, Sergej; Adamitz, Dennis)

80

Portables Mikro-BHKW zur Anwendung im Gebäude und im Elektro- fahrzeug

(Hanif, Haider Iqbal; Rüscher, Henrik; Cartier, Philipp; Gusig,
Lars-Oliver)

95

Diagramme & Fakten

Daten aus den Bereichen Energie, Mobilität, Prozesse

105

Unsere Autoren

115

Vorwort der Forschungscluster-Sprecher

Das Forschungscluster Energie, Mobilität, Prozesse: Interdisziplinär vernetzt zu höherer Energieeffizienz

(Lüdersen, Ulrich; Gusig, Lars-Oliver)

Mit Stolz präsentieren wir den ersten Band der Schriftenreihe Angewandte Forschung für die Welt von morgen, der vom Forschungscluster EMP herausgegeben wird.. Die Welt unterliegt einer stetigen Veränderung und mit dem fakultätsübergreifendem Forschungscluster Energie-Mobilität-Prozesse (kurz: EMP) als Forschungsverbund der beiden Institute IKME (Institut für Konstruktionselemente, Mechatronik und Elektromobilität) und IVEK (Institut für Verfahrenstechnik, Energietechnik und Klimaschutz) stellen wir uns diesem Wandel. Wir vernetzen einzelne Bereiche der Fakultäten I – Elektrotechnik und Fakultät II – Bioverfahrenstechnik und Maschinenbau, legen den Fokus auf Transparenz und präsentieren hiermit unsere Forschungsaktivitäten.

Die Kombination der Fakultäten im Forschungscluster stellt eine optimale Grundlage für die Erforschung und Entwicklung von neuen innovativen Produkten und Prozessen in den gesellschaftspolitisch wichtigen Bereichen der Energieversorgung, der Energieeffizienz, der Mobilität und der Prozess- und Anlagentechnik dar. Durch den interdisziplinären Ansatz, der Verknüpfung von wissenschaftlichen und technischen Kompetenzen aus den Bereichen Informationsverarbeitung, Automatisierungstechnik, Energietechnik, Konstruktion und Verfahrenstechnik, werden anwendungsorientierte neue Lösungsansätze und Entwicklungen getätigt, die von hoher gesellschaftlicher Relevanz sind. So erfordert zum Beispiel gerade der Wandel in der Mobilität ein großes Forschungsaufkommen auf technischer aber auch auf sozioökonomischer Seite. Die Ablösung der Hauptkomponente, individuell gesteuerte private PKWs mit Verbrennungsmotor, hin zu einer Vielfalt an Transportvarianten wie z. B. Elektroauto, Pedelec, E-Roller, Fahrrad als CO₂-neutrale Fortbewegungsmöglichkeit stellen vielschichtige Herausforderungen auf technischer und gesellschaftspolitischer Ebene dar. Die in der Schriftenreihe aufgenommenen Kennzahlen und die Datenauswahl, welche die Forschungsarbeiten flankieren, und ebenso die Relevanz der Forschungsfelder für die Energieversorgung und Mobilitätsfragen von Morgen zeigen, dienen als Motor und Weichenstellung für zukünftige Generationen.

Das EMP geht auf wesentliche gesellschaftlich relevante Zukunftsthemen ein, dessen Forschungsergebnisse auf einem offenen Diskurs und Beteiligungen der Mitarbeiter in vielen Fachausschüssen, Konferenzen und Diskussionsforen basieren. Die Ergebnisse dieser Tätigkeiten werden durch die Schriftenreihe transparenter gemacht und interessierten Lesern zur Verfügung gestellt. So können Sie sich auf interessante Artikel zu einer Vielzahl von Themen freuen, u. a. geht es um Urbane-Logistik, portable Mikro-BHKWs, eine Rotationskältemaschine, Pedelecs in Mietsystemen und weitere interessante Themen. Eine Fortsetzung der Schriftenreihe und ein Innovations-Workshop sind geplant.

Unser Dank geht an die EMP-Forscherguppe für die hochwertigen Beiträge und an das engagierte Redaktionsteam für die professionelle Unterstützung und Begleitung der Erstellung dieser Schriftenreihe. Des Weiteren bedanken wir uns beim Präsidium der Hochschule Hannover für die wohlwollende Förderung der Veröffentlichung zur Darstellung der Forschungsaktivitäten.

Prof. Dr.-Ing. Ulrich Lüdersen

Institutsleiter IVEK – Institut für Verfahrenstechnik, Energietechnik und Klimaschutz

Prof. Dr.-Ing. Lars-Oliver Gusig

Institutsleiter IKME – Institut für Konstruktionselemente, Mechatronik und Elektromobilität

Grußwort Präsidium

(Bott, Oliver J.)

„Unsere Hochschule ist eine regional und überregional anerkannte Partnerin und Impulsgeberin für Wirtschaft und Gesellschaft: als qualitativ hochwertiger wissenschaftlicher Bildungsanbieter, als kreative Forschungsstätte und als vorbildlicher Arbeitgeber.“

Zitat aus dem Vision Statement der Hochschule Hannover

Die Hochschule Hannover (HsH) ist eine der größten Fachhochschulen in Niedersachsen. Verteilt über fünf Fakultäten studieren in derzeit 61 Bachelor- und Masterstudiengängen mehr als 10.000 Studierende (Stand 2019). Mit ihrem anwendungs- und praxisbezogenen Studiengangs Portfolio ist die Hochschule Hannover damit ein wichtiger Baustein in der regionalen und überregionalen Fachkräfteausbildung.

Neben dem Bildungsauftrag ist die HsH aber auch der anwendungsorientierten Forschung und Entwicklung sowie dem forschungsbasierten Transfer verpflichtet. Die zunehmende Bedeutung dieses dritten Aufgabenbereichs zeigt sich auch in der politischen Landschaft, in der zum Beispiel spezifisch auf den Aufgabenbereich Transfer ausgerichtete Förderprogramme ausgeschrieben werden und aktuell über eine Landestransferstrategie diskutiert wird. Fokussiert wird hierbei insbesondere auf die Rolle der Fachhochschule als Vermittler der Erkenntnisse angewandter Forschung in Wirtschaft und Gesellschaft.

Und hier hat die HsH einiges zu bieten: 7,1 Millionen Euro Drittmittelinwerbungen in 2018 sprechen für sich und lassen darauf schließen, dass die Hochschule Hannover nicht nur auf dem Gebiet der Lehre, sondern auch auf dem Gebiet der angewandten Forschung hohe Anerkennung findet und damit auch ein erhebliches Transferpotenzial bietet.

Den hierfür nötigen Forscher*innengeist zu beflügeln hat sich die HsH im Rahmen ihrer Forschungsstrategie zur Aufgabe gemacht. Dies besteht aus drei Säulen:

- 1. Förderung individueller Forschung als Keimzelle größerer Forschungsinitiativen**
- 2. Graduiertenförderung zur Unterstützung der Ausbildung wissenschaftlichen Nachwuchses im Rahmen kooperativer Promotionsverfahren**
- 3. Förderung von Schwerpunkten angewandter Forschung im Rahmen eines Förderprogramms zur Einrichtung von Forschungscluster.**

In 2017 sind in diesem Rahmen sechs Forschungscluster eingerichtet worden, in denen Forschende fakultätsübergreifend zentrale Fragen angewandter Forschung bearbeiten. Eines dieser Forschungscluster heißt „Energie – Mobilität – Prozesse“ (EMP), das auf die Energieversorgung der Zukunft fokussiert, sowie auf nachhaltige E-Mobilität und energieeffiziente verfahrenstechnische Prozesse. Unter der Federführung von Prof. Dr.-Ing. Ulrich Lüdersen aus der Fakultät II Maschinenbau und Bioverfahrenstechnik engagieren sich im Cluster EMP die Forschungsinstitute „Institut für Konstruktionselemente, Mechatronik und Elektromobilität“ (IKME) und das „Institut für Verfahrenstechnik, Energietechnik und Klimaschutz“ (IVEK). Beide Institute gehören zur Fakultät II der Hochschule Hannover und arbeiten zusammen mit der Energieeffizienzforschung der Fakultät I Elektro- und Informationstechnik.

Die vorliegende Schrift greift aktuelle Forschungsergebnisse des EMP-Clusters auf und ist damit zugleich die erste Ausgabe einer neu eingerichteten Schriftenreihe „Angewandte Forschung für die Welt von morgen“, die nicht nur den Forschungsclustern und Instituten der Hochschule Hannover ein Forum zur Veröffentlichung ihrer Forschungsergebnisse bieten soll, sondern jeglicher angewandten Forschung an dieser in Bezug auf ihre Arbeitsgebiete ausgesprochen facettenreichen Hochschule. Die Schriftenreihe ist entsprechend der Open-Access-Policy der HsH auf freie Zugänglichkeit ausgerichtet und elektronisch über den Schriftenserver SerWisS der Hochschule unter <https://serwiss.bib.hs-hannover.de/> abrufbar.

Als Vizepräsident für Forschung, IT- und Informationsmanagement freue ich mich, dass es gelungen ist, Ihnen, liebe Leserinnen und Leser, mit Einrichtung dieser Veröffentlichungsreihe einen Einblick in die vielfältigen Forschungsthemen der HsH anbieten zu können.

Mein besonderer Dank gilt hierbei den Koordinatoren der ersten Ausgabe der Forschungsreihe aus dem EMP-Forschungscluster, Prof. Dr.-Ing. Ulrich Lüdersen und Prof.-Dr.-Ing Lars-Oliver Gusig sowie allen Autor*innen und unterstützenden Mitarbeiter*innen des EMP-Teams. Weiterhin gebührt besonderer Dank den an der Entwicklung der Veröffentlichungsreihe beteiligten Mitarbeiter*innen der zentralen Einheiten.

Ich wünsche Ihnen viele wertvolle Erkenntnisse bei der Lektüre der Artikel dieser Ausgabe!

Prof. Dr.-Ing Oliver J. Bott

Vizepräsident für Forschung, IT- und Informationsmanagement

Status quo of urban logistics in science, politics and practice

Developing an approach for urban logistics projects in the Hanover region
von Viebahn, Christoph; Auf der Landwehr, Marvin; Trott, Maik; Gusig, Lars-Oliver

ABSTRACT - As foundation for initiating an urban logistics project in Hanover, a detailed analysis on existing tools and measures has been conducted. By merging the results of three different multi-national state of the art analysis, a group of six categories with in total 23 measures could be classified, evaluating their environmental and economic impact. A list of 63 international examples gives a solid overview to support new project teams with the means to identify and prioritize a set of actions to be taken into closer consideration. The paper pools the main issues of meta-studies screening science (Wolpert and Reuter, 2012), delivering a synopsis of the political approach (EC 2012) and fitting best practice (van Audenhove et al. 2015, Civitas 2015, BestUFS 2015). Selected measures are explicitly examined in order to provide additional insights on the status of different logistics concepts and complement priory defined categories, measures and examples. By conclusively elaborating the status of existing measures, new projects are supported in terms of project prioritization, set-up, initiation, execution and assessment.

Introduction

Urban freight transport (UFT) accounts to a substantial amount for air pollution in urban areas (Wolpert and Reuter 2012, p. 114). It compromises about 25 % of road traffic in an average city (Dablanc 2007, p. 280-281). Vehicles related to UFT cause roughly 20 % to 30 % of all driven kilometres within the territorial unit, emitting, depending on the individual substance, between 16 % and 50 % of pollutants (ibid.).

As there are currently very few activities regarding urban logistics in Lower Saxony, several stakeholders located in the area in and around Hanover initiated a joint urban logistics initiative: The City of Hanover, Volkswagen Commercial Vehicles, Deutsche Post DHL, Enercity, Hochschule Hanover, Leibniz University Hanover, Technische Universität Braunschweig and the federal state Lower Saxony (LHH 2018). The Hochschule Hannover (HsH; University of Applied Science) established an interdisciplinary team, incorporating the expertise of different faculties in order to develop strategies for improving the movement of goods within the Hanover metropolitan area. The paper focuses on the results of the HsH-team concerning the status quo of urban logistics in science, politics and practice as well as future development scenarios and a possible assessment approach by means of simulation models.

The Hanover metropolitan area

The state capital Hanover is an important European logistics location, offering an excellent infrastructure for all modes of transport. Based on its tradition as a car-friendly city and due to its logistical significance within Europe and Germany, Hannover has excellent conditions for occupying and rethinking urban logistics (LHH 2013). More than 4 million people live in the Hanover metropolitan area, comprising the larger cities of Hanover, Brunswick, Göttingen and Wolfsburg as well as numerous medium sized and small cities. Thanks to its expedient position across the motorways A2 and A7, major railway routes, prominent navigable waterways and an international airport, Hanover plays an important role as location for the logistics sector. The city's relevance comprises both the role of the logistics sector itself as well as the framework conditions for urban logistics, which supplies the inhabitants and enterprises of the region (Sustrade et al. 1995).

In a recent report, the Hanover political council pledges to reduce greenhouse gas emissions (GHG) by about 95 % and final energy consumption by 50 % until 2050 (LHH 2013). It describes a trend path (What will happen, when we do not interfere?) as well as an intended path (Where do we want to head for?) with regards to reaching the above described reductions. Further command variables are described in the clean air plan (LHH 2011). Measures in order to reach these goals are described in the master plan mobility and the concept study on climatic friendly commercial traffic (IML 2014).

In 2017, the project initiative “Urban Logistics Hanover” was launched with industry and science partners to support the depicted goals and cope with objectives of the political council. With the overall initiative's aim to make the Hanover metropolitan area a competence region for urban logistics until 2030, various fields of action are being worked on that focus on creating innovative, emission-free and city-compatible logistics concepts (LHH 2013).

Categories, measures and examples

In order to structure the issue as a whole, meta publications summarizing the status quo of urban logistics in science, politics and practice have been reviewed first (Table 1; e.g. van Audenhove et al. 2015; EC 2012; Wolpert and Reuter 2012). As neither of these combine an exhaustive scope, an in-depth evaluation of measures and a thorough list of best practice, our team has merged the essentials of these studies into a single matrix.

The merged structure of former development approaches, including the most appropriate measures from other cities and best practices, and the classification into six categories ensures that all possible measures are taken into closer consideration.

Table 1: Different approaches for categories of measures in order to manage urban logistics projects

EC	VAN AUDENHOVE	WOLPERT AND REUTER
Regulatory measures	Regulatory and land planning	Access restrictions
Land use planning measures		Land use management
Market-based measures	(Financial) Incentives	
Infrastructure measures	Infrastructure	Public Infrastructure
Management and other measures		
New technologies	Equipment and technology (enablers)	Traffic management

Categories and measures

Table 1 shows, that only the EC report covers the whole range of relevant topics. Some measures can be matched directly among the papers, while e.g. the category *management and other measures* is exclusively contained in the EC report, containing important features such as urban logistic plans, lorry routing. Wolpert and Reuter (2012, p. 114) himself points out that using his structure means some measures “*cannot be assigned to one of the four groups*”. It is therefore recommended to use the categories introduced by the EC report as a basis.

The EC report also contains a very feasible definition of UFT: “*The movement of freight vehicles whose primary purpose is to carry goods into, out of and within urban areas*” (EC 2012, p. 2). Furthermore, only the EC report evaluates the measures according to economic and ecological impact. The report derives the following objectives of an urban logistics project (ibid.):

- “*maximising the economic efficiency of distribution in urban areas*”
- “*minimising the environmental and social impacts*”
- “*taking into account the complete door-to-door transport chain*”

The excellence of the paper from van Audenhove et al. (2015) is, besides giving a good compact overview on the topic, naming best practices, outlining the main results as a one-pager-table as well as using a memorable wording (e.g. *greener trucks*). Wolpert and Reuter (2012) completes with a profound overview on scientific literature. Merging the above named sources results in Table 2, giving a profound structure for urban logistics projects.

Table 2: Merger categories EC-Report (EC, 2012) and ADL-Paper (van Audenhove et al., 2015)

Categories	Nr	Measures	Ref.	Categories	Nr	Measures	Ref.
Regulatory measures	1.1	Time slots, time windows	EC, ADL	Management and other measures	5.1	Consolidation of supply of UFT; urban distribution center (UDC)	EC, ADL
	1.2	Vehicle weight and size restrictions	EC, ADL		5.2	Networks and partnerships (e.g. of e-commerce pick-up points)	EC, ADL
	1.3	Low Emissions Zones (LEZs)	EC, ADL		5.3	Freight stops	EC
	1.4	Harmonisation	EC, ADL		5.4	Subsidies and permissions	EC
Land use planning measures	2.1	Adequate parking spaces for freight vehicles (exclusively zones)	EC, ADL		5.5	Delivery and logistic plans	EC
	2.2	Safeguard sites close to city centres	EC, ADL		5.6	Routing	EC
	2.3	Creating specific zones for retail and logistics (e.g. in the outskirts)	EC, ADL		5.7	Night deliverys	EC
Market-based measures	3.1	Urban congestion charging	EC, ADL	New technologies	6.1	Greener trucks; low emission vehicles (LEV)	EC, ADL
	3.2	Mobility credits, smart fare	EC, ADL		6.2	Implementation of Big Data analytics, intelligent traffic systems (ITS) and ICT	EC, ADL
	3.3	Indirect subsidies to “virtuous” UFT operators via differentiation	EC		6.3	Alternative transportation means	ADL
Infrastructure measures	4.1	Rail-connected distribution parks/logistics zones (direct injection)	EC, ADL		6.4	Crowdsourced delivery solutions	ADL
	4.2	On-street loading and unloading bays	EC, ADL				

The categories used by Civitas (2015) and BestUFS (2015) are not suitable for obtaining a holistic picture on the topic, as the keywords represent rather separate and individual measures than well-balanced, synoptic categories. Van Rooijen (2014) describes the eight different thematic categories of measures used within CIVITAS documents: (1) clean fuels and vehicles, (2) collective passenger transport, (3) demand management strategies, (4) mobility management, (5) safety and security, (6) car independent lifestyles, (7) urban freight logistics, (8) transport telematics.

Examples and best practice

The EC report delivers a profound evaluation of economic and environmental impact of the described measures. The verbally named impact has been complemented (grey filling) and transferred into a basic scoring model. This allows summing up the criteria aimed for decrease (e.g. green house gas) and increase (e.g. air quality). Table 3 shows, that category 5 (*management and other measures*) and 6 (*new technologies*) are most likely to generate a significant impact on the desired criteria. As van Audenhove et al. (2015) quote several year old best practices, they have been completed by using the Civitas database (projects listed as *urban freight logistics* and *transport telematics*) and BestUFS database, resulting in Table 4.

[illegible]

Table 4: Best practice (van Audenhove et al. 2015; BestUFS 2015; Civitas 2015; EC 2012)

Nr	Best-practice (EC; ADL; Civitas; BestUFS)
1.1	Paris: Time slots per type of truck in Paris city center; Ljubljana: Weight limits and time-based access restrictions; Malaga: Weight and time restriction
1.2	Berlin: Low-emission zone since 2008; Usti nad Labem: Reasonable access, establishment of ecological zones, limiting access of vehicles above particular weight; Craiova: Central low-emissions zone; Sweden:
1.3	Environmental zone (Low Emission Zone) scheme
1.4	
2.1	London: Exclusivity zone for DHL around LHR; Ghent: Goods distributors park on the street incl. parking spaces; Norwich: Park and ride Goods deliveries to park and ride sites; Kraków: Controlling access by goods vehicles to protected zones; La Rochelle: Specific urban delivery zones; Rotterdam: Truck parking management
2.2	
2.3	Bologna: Interporto Bologna freight village
3.1	London: Congestion charge; Switzerland: The Heavy Vehicle Fee (LSVA)
3.2	San Diego: I-15 Hot Lanes; Krakow: Mobility credits scheme; Genova: Mobility credits system
3.3	UK & France: Lower rates of vehicle tax for goods vehicles that meet the required emissions criteria; UK, France, Switzerland: Lower tax rates for alternative fuels
4.1	Paris: Direct injection via canal through central injection point, unloading space and non-road modes; Utrecht: Waterborne freight distribution
4.2	Barcelona: Bus lanes used for goods drop-off during nights Tel Aviv, Yafo: Policies developed for efficient loading/unloading of freight in commercial city centre streets
5.1	Ningbo: DHL UDC; Antwerp: bpost city logistics; Göteborg: Consolidation centre in the Lindholmen area of the city; Utrecht: Urban distribution centres (UDCs) pick-up point; Bath: Urban Freight Consolidation; Berlin: Establishing an inner-city logistics centre; Stockholm: Downtown logistics centre and time gap delivery; London: Heathrow Airport Retail UCC; Bristol: UCCs serving town/city; Paris: Urban Consolidation centre which uses electric vehicle; Hammarby: UCC
5.2	USA: Amazon Lockers; Göteborg: Consumer driven goods management from a Mobility Centre base; Winchester: Collectpoint services, Ljubljana: Local freight network; Bristol: Freight consolidation scheme, Norwich: Collection needs and identify where these could be combined and made more efficient
5.3	
5.4	Bremen: Implementing an UCC, Göteborg: Incentives for purchasing clean heavy duty and distribution vehicles
5.5	Bologna: Urban freight delivery plan; Isi: Strategic Goods Distribution Plan; Rotterdam: Creating a high-quality network for sustainable freight transport, Netherlands: The PIEK and DEMO programmes
5.6	Ploiesti: Freight partnership, planning and routing; Stuttgart: Priority network for Heavy Good Vehicles (HGV); Craiova: Information tools for fleet management; Tallinn: Lorry routing for strategic traffic, smooth freight and city logistics
5.7	Barcelona: Night deliveries using silent vehicles and equipment
6.1	Denmark: Pilot for use of EV by Post Denmark; Utrecht: Cargo-Hopper; Norwich: Optimising urban goods deliveries and using clean and energy-efficient vehicles; Bremen: Introducing compressed natural gas trucks, Germany: Hermes Logistic Group uses EV; Paris: ADEME-project "Green truck experiment", La Petite Reine, L'Oreal/Gefco/EDF experiment using EV, Monoprix/GEODIS experiment using CNG vehicles
6.2	Hamburg: Smart city system connecting port logistics and city traffic; Parma: Consolidation delivery and ICT Ecocity service; Brno: ITS delivery support and city distrib. centre; Malmö: Installation of on-board computers + satellite traffic management system; Venezia: Developing a webtool to manage loading bays, Tel Aviv, Yafo: ICT & ITS Based Transportation Information Provision; Malaga: Intelligent traffic control and software development for Management Centre of Mobility (MOVIMA); Bath: Demand Management for Goods Vehicles by Automatic Number Plate Recognition (ANPR)
6.3	Paris: Urban rail logistics used by retailer Monoprix, Programme National Marchandises en Ville in France / ADEME incl. experiments of electric and CNG delivery vehicles, ad hoc deliveries tricycle and consolidation; Donostia - San Sebastián: Clean vehicles for last mile delivery in addition to FCC and load bays; Perugia: Concept of freight distribution via pipes; Rotterdam: MultiCore tube logistics
6.4	Paris: Deliver.ee platform of professional couriers

Further projects established in the community have been added. As best practice for greener trucks, ADL points to the Post Denmark, using 50 Mercedes-Benz Vito E-CELL (DVZ 2013). Today DHL outperforms this by far, using 9,062 electric vans type Streetscooter on German roads (09/2018) for postal services (KBA 2018).

Key Performance Indicators

Data on key performance indicators (KPIs) have been extracted from meta publications and scientific studies on performance indicators in urban logistics, to provide a thorough KPI framework for further investigations (Table 5; e.g. Browne et al. 2011; Gogas and Nathanail 2017; Patier and Brown 2010; Jaller et al. 2016; Thompson 2015; Van Duin et al. 2010; Zanin et al. 2013).

Neither the paper from van Audenhove et al. (2015) nor the EC (2012) study provide a more detailed basis of assessment for measuring the effectiveness of individual measures. Consequently, additional key figures have been collected and assigned to the individual, priority defined impact categories in order to allow for a more detailed scope of examination. Table 5 provides an overview about all suitable key performance indicators in relation to the individual impact categories. Furthermore, separate sub-categories allow for an additional classification of the measures in terms of their respective impact. Due to the fact that no suitable indicators could be found for the impact factor "Transferability across EU", the respective category has been left out in the schematic representation.

Status of important measures

In relation to the identified categories and measures concerning urban logistics development, several concepts of selected measures will be elaborated in the following section in order to provide new insights on the individual categories of measure, aiding in obtaining a thorough and representative overview about the status quo of urban logistics in science, politics and practice.

Status of measures

The measure "Public-private partnerships" is fundamental for urban logistics development, as efficient and sustainable urban freight transport require organizational measures that cannot be achieved without public-private understanding, cooperation and partnerships.

Table 5: Key performance indicators on pre-defined impact categories (Browne et al. 2011, Gogas and Nathanail 2017, Patier and Brown 2010, Jaller et al. 2016, Thompson 2015, Van Duin et al. 2010, Zanin et al. 2013)

Impact	Measure	Nr.	KPI
Economic	UFT operational costs	1.1	Avg. travel times per journey
		1.2	Avg. travel time on critical network parts
		1.3	Variability of travel times
		1.4	Avg. number of stop per journey
		1.5	Avg. duration of a stop in a journey
		1.6	Rate of failed and late deliveries
		1.7	Avg. travel speed during business hours
		1.8	Avg. travel speed during off hours
		1.9	Freight vehicle load factor
		1.10	Distance between nearest consolidation station and city center
		1.11	Avg. distance travelled between stops
		1.12	Avg. loading and unloading times
		1.13	No. of incidents
		1.14	No. of participants
		1.15	Delivery costs for goods measured by personnel costs outside opening hours
		1.16	Costs of a UCC
		1.17	Avg. operating costs for the service
	Road congestion	1.18	Delay times between stops
		1.19	General traffic congestion rate
		1.20	Daytime road occupancy
		1.21	Kerbside occupancy during unloading
Ecologic	Noise	2.1	Noise levels during daytime
		2.2	Noise levels during night time
	Pollutants	2.3	CO emissions
		2.4	CO ₂ emission
		2.5	NO _x emissions
		2.6	SO _x emissions
		2.7	GHG emissions
		2.8	PM VOC emissions
		2.9	PM NH ₃ emissions
		2.10	PM 10 emissions
		2.11	PM 2.5 emissions
		2.12	Total emissions
	Air quality	3.1	CO concentration
		3.2	SO _x concentration
		3.3	NO _x concentration
		3.4	VOC concentration
		3.5	NH ₃ concentration
		3.6	PM 10 concentration
		3.7	PM 2.5 concentration
		3.8	GHG concentration
	Health	3.9	No. of injuries from crashes
		3.10	Est. impacts on mortality and morbidity by contaminants
	Safety	3.11	No. of crashes
		3.12	No. of thefts (equipment and goods)
Value for public sector	Community impact	4.1	No. of freight vehicles traveling near sensitive areas
		4.2	No. of freight vehicles parking near sensitive areas
		4.3	Maintenance cost (public infrastructure)
		4.4	Citizen complaints
	Finance	4.5	Cost of subsidies
		4.6	Cost for enforcement policies
	Connection between stakeholders	4.7	No. of round tables and meetings
		4.8	No. of known interest (all stakeholders)

They serve as platform for the exchange between different stakeholder groups, such as logistics service providers, enterprises and local authorities on problems and solutions in urban logistics (EC 2012). Exchanging knowledge in the course of personal meetings or via specifically designed websites offers the opportunity for representatives of different stakeholder groups to obtain insights into relevant logistics processes and to gain information that are important for planning new measures (Muñuzuri 2005). Consequently, the understanding of problems for different stakeholder groups is improved, which additionally aids in the coordination between stakeholders when it comes to defining common goals and estimate impacts as well as contributions of planned measures (van Audenhove et al. 2015). Accordingly, in the final report of the study on Urban Freight Transport, the European Commission advises city authorities to consult relevant stakeholders before implementing measures on urban logistics planning (EC 2012).

Since the general public is not directly involved in private public partnerships, but represented by governments and local authorities, the latter fulfil a communicator role, passing on relevant information from the partnerships to the public in order to advertise problems, raise awareness and elucidate the proposed solutions (Visser 2015). As a result, proponents from the general public could promote measures or encourage the acceptance within the public with regards to the status quo of urban freight transport, increasing the implementation rates of proposed measures. Moreover, the emphasize on urban freight transport and the related, growing public interest offers politicians a stronger initiative to engage in solving urban logistics problems. Finally, the public can also be employed to generate and propose new solutions, increasing the range of concepts and ideas for logistics measures.

A study on stakeholder partnerships in logistics proves that public-private partnerships are not seen as particularly valuable, since they provide concrete measures as categorizable and measurable achievements in the cooperation of various stakeholder groups (hard successes), but because they achieve “soft successes”, such as an improved communication and cooperation between stakeholders, a better understanding of freight issues and the promotion of "Good Practice Innovations" (Browne et al. 2015). Thus it can be assumed that public-private partnerships can offer an additional short term value in terms of improved cooperation and communication among stakeholder groups, even if no measurable success concerning the determination or implementation of measures can be achieved. However, it needs to be ensured that relevant stakeholders have the permission to share important information from their organization as well as to integrate the results of the partnership in order to maximize the real value of public-private-partnerships (ibid.).

An “Urban Consolidation Center” (UCC) serves the purpose of bundling deliveries from several supplier to different customers. Goods will be stored in an UCC, which are often located on the outskirts of urban city areas, before they will be consolidated and delivered (Van Duin and Muñuzuri 2015). An expanded form of urban distribution is the two-tier or two-echelon system, in which, in contrast to a central UCC, additional loading points are installed within urban centres, often referred to as mini-hubs, from which goods are delivery on the Last Mile by environmentally friendly transport vehicles such as cargo bikes (ibid.).

The primary purpose of UCCs is to reduce transport and consequently road congestion as well as emissions by increasing the capacity utilisation of delivery vehicles (Van Duin et al. 2008).

An investigation of several pilot projects revealed recurring success factors for the UCC concept, including cost efficiency due to subsidies, offering of value added services as well as constant information exchange among relevant stakeholders and municipalities. Moreover, the number of users, the selection of appropriate vehicles for Last Mile transport, the location of the UCCs and management executed by private companies were identified as supporting factors. On the contrary, the main reasons for failure of some projects was low profitability due to low utilization rates as well as underdeveloped technology concerning delivery vehicles (ibid.). To increase the probability of successfully establishing and operating an UCC, it is recommended that local and national authorities develop supporting regulations, that the communication between relevant stakeholders is fostered, that planning tools and guidelines are developed and that clear policy objectives and framework conditions are formulated to support tailor-made local measures (Van Duin and Muñuzuri 2015).

The main obstacle for implementing an urban UCC is the high costs for installation and operation. Relevant costs factors include expenditures for property and real estate, which are directly influenced by the geographical area as well as the designated location, construction costs, personnel costs and vehicle costs based on fixed purchasing prices as well as variable costs for fuel and insurance (Van Duin et al. 2008). Consequently, the profitability of UCCs become a major concern, especially if no subsidies from the public sector are available. High utilization rates in terms of the amount of customers supplied by an UCC are required and constitute an important success indicator. Van Duin et al. (2008) show simulation results for a hypothetical UCC in Den Haag, proving that the operation of the center requires a market share of at least 30 % in order to generate economically reasonable results. However, to achieve this target, a competitive pricing strategy as well as effective promotional strategies are preconditioned (ibid.). Other studies simulating the economic and ecological effects of an UCC in London (Browne et al. 2011) and Belo Horizonte (De Assis Correia et al. 2012) reflect these results.

“Off-peak-hour delivery” (OPH-delivery) aims at shifting delivery times windows out of the conventional business hours in order to reduce road congestion, emissions as well as emissions peaks and to minimize conflict potential emerging from the simultaneous network use of transport vehicles, pedestrians and bicycles. Additionally, within this concept, suppliers are expected to be able to reduce the duration of a delivery tour, due to an increased amount of parking space as well as a decreased traffic density during off-peak hours (Jaller et al. 2015;

Sánchez-Díaz et al. 2016). As a result, the delivery rates increase, directly facilitating and enabling reduced service costs, a higher profitability, more favourable transport conditions for customers in terms of reliability as well as a more efficient fleet and staff management for service providers (ibid.).

Since the determination of a supplier's delivery period primarily depends on customer preferences, which hence is a decisive factor for the introduction of OPH-deliveries, it is particularly important to convince both suppliers in urban areas as well as the concerned inhabitants of the benefits from this measure. For this purpose, basically four different implementation approaches can be distinguished, as represented in Figure 1 (Holguin-Veras et al. 2015; Sánchez-Díaz et al. 2016).

Both the laissez-faire as well as the road pricing approach have proven to be very ineffective and unsuccessful in terms of enhancing acceptance and utilization of OPH-deliveries. However, road pricing incentives indicated a positive side effect of a reduced amount of private car traffic, offering a potential benefit to delivery service providers as well. On the contrary, public sector initiatives including monetary incentives, such as one-off subsidies, permanent subsidies and discounts from suppliers, as well as non-monetary incentives, such as public recognition for the participation in the OPH-program showed great effects on improving OPH-delivery utilization. Despite of the fact that access restrictions for selected urban areas during business hours showed a significant impact on successfully integrating OPH-concepts, they were also often violated in pilot areas and reaped a lot protests from local companies, who claimed a negative effect from the restrictions on their business (ibid.).

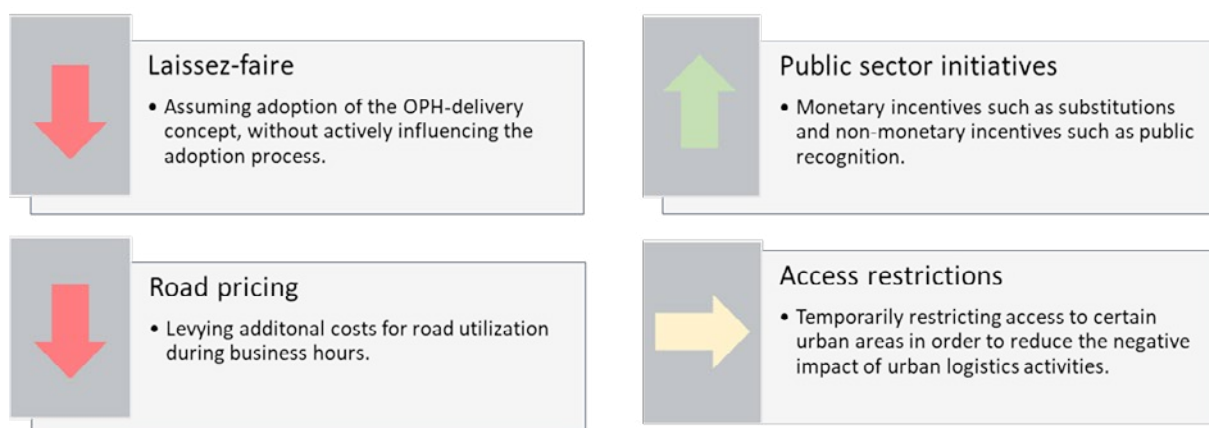


Figure 1: Implementation approaches for the OPH-delivery concept (Holguin-Veras et al., 2015; Sánchez-Díaz et al., 2016).

Nevertheless, access restrictions are a very common transport project in many cities and have a high significance for stakeholders in urban mobility planning (Wulfhorst et al. 2013, p. 42). A central point in the management of OPH-deliveries is the organisation of unloading goods at commercial customer branches. In practice, two schemes of personnel and independent supply can be applied here. In the primary case, staff of the respective client organization supports and monitors the unloading process, so that the risks for damages and theft can be minimized. However, this approach also requires additional personnel costs, which arise due to increased wages and potential objections of trade unions against staff deployment after business hours (Jaller et al. 2015; Sánchez-Díaz et al. 2016). In the latter case, the delivery process is carried out solely by the forwarding agent. This scheme is more cost-effective in the long term, as little or no additional personnel costs are incurred. Nevertheless, it also requires high initial investments for technological systems, ensuring the overall possibility to employ this method as well as a high degree of security (Holguin-Veras et al. 2015).

Apart from unloading management, reducing noise emissions is a major concern for OPH-delivery concepts, too. Measures such as reconstructing loading and unloading facilities, the improvement of handling equipment, switching to low-noise transport vehicles, retrofitting vehicles and adapting training programs to teach staff quiet unloading techniques, as being promoted in the PIEK-Program in the Netherlands, facilitate reaching and maintaining desired noise levels (ibid.). Technologically it is possible to implement logistics during off-peak-hours including minimized noise emissions. While regulatory limits in Germany are very strict compared to Europe, they still can be satisfied, as nowadays many new technologies for quiet transportation and logistics activities such as loading and unloading are available. Moreover, developments in battery technology and mass production of electric trucks are expected to significantly increase performance and reduce costs in the near future. However, apart from investing in trucks and un-/loading technologies, also significant expenditures for branches are required to protect residents from potential noise emissions. Whereas costs, quality and range become more and more plannable, legal compliance is still a major risk factor. Various changes in terms of legislation and approval procedures are required in Germany in order to allow innovative concepts like OPH-delivery to flourish. City-compatible logistics is expensive and time-consuming. Hence, logistics service providers will only invest in quiet logistics if, similar to the Netherlands, they have legal certainty and user incentives for nocturnal, low-noise delivery (Vastag et al. 2017, p. 82).

Conclusion

Existing databases exhibit an enormous variety of applied measures and examples. It is difficult for new projects to identify the most appropriate measures for a new setting in a specifically defined urban situation. By merging the three approaches into one structure, it is ensured that all possible measures are taken into closer consideration. A classification into six categories helps to focus on relevant topics. Looking at the impacts from the given examples, a first preselection of appropriate measures for a defined new project setting can be identified much more easily. Moreover, an overview about the most common key performance indicators on the pre-defined impact categories aids in identifying urging pain points in urban logistics scenarios and consequently take appropriate measure. Thus, a well-structured approach helps the project partners in Hanover to set up a cross-functional team and to decide on the approaches from other cities to be taken into closer consideration.

By delivering an overview about the current status of selected, new projects can be amended to both, current needs and trends of relevant stakeholders as well as developments and requirements that are likely to emerge in the near future. Thus, the probability of planning, implementing, executing and completing new projects successfully can be substantially increased.

References

van Audenhove, François-Joseph; Jongh, Sam de; Durance, Marc (2015): Urban Logistics. How to unlock value from last mile delivery for cities, transporters and retailers. Edited by Arthur D. Little (ADL). Available online at http://www.adlittle.com/sites/default/files/viewpoints/ADL_Urban_Logistics.pdf, checked on 4/17/2019.

Auf der Landwehr, Marvin; Trott, Maik; von Viebahn, Christoph (2018): Urban freight traffic in Hanover (Germany) - Evaluation of logistics concepts using a multi-stage system. Poster presented at 3rd VREF Conference on Urban Freight, Gothenburg. 17.-19.10.2018

Bennühr, Sven; Ehren, Harald; Gringer, Juliane; Neuling, Ingo (2018): What Cities Want. Relevante und Nachvollziehbare Zukunftsentwürfe Für die City Logistik im Jahr 2030. Eine Szenarioforschungsstudie von KantarTNS im Auftrag von Volkswagen Nutzfahrzeuge und MANTruck&Bus. Edited by DVV Media Group. Hamburg. Available online at <https://www.dvvmedia-shop.de/dvz/buch/285/what-cities-want>, checked on 4/17/2019.

BestUFS (2015): Best Urban Freight Solutions. Available online at <http://www.bestufs.net/>, checked on 4/17/2019.

Browne, Michael; Allen, Julian; Leonardi, Jacques (2011): Evaluating the use of an urban consolidation centre and electric vehicles in central London. In *IATSS Research* 35 (1), pp. 1–6. DOI: 10.1016/j.iatssr.2011.06.002.

Civitas (2015): Urban freight logistics. Available online at <https://civitas.eu/measures/urban-freight-logistics>, checked on 4/17/2019.

Dablanc, Laetitia (2007): Goods transport in large European cities: Difficult to organize, difficult to modernize. In *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 41 (3), pp. 280–285. DOI: 10.1016/j.tra.2006.05.005.

Correia, Vagner de Assis; Oliveira, Leise Kelli de; Guerra, André Leite (2012): Economical and Environmental Analysis of an Urban Consolidation Center for Belo Horizonte City (Brazil). In *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 39, pp. 770–782. DOI: 10.1016/j.sbspro.2012.03.146.

EC (2012): DG MOVE European Commission: Study on Urban Freight Transport. Final Report. With assistance of MDS Transmodal Limited, Centro di ricerca per il Trasporto e. Available online at <https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/themes/urban/studies/doc/2012-04-urban-freight-transport.pdf>, checked on 4/17/2019.

Gogas, Michael A.; Nathanail, Eftihia (2017): Evaluation of Urban Consolidation Centers: A Methodological Framework. In *Procedia Engineering* 178, pp. 461–471. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.01.089.

Holguín-Veras, José; Sánchez-Díaz, Iván; Jaller, Miguel; Aros-Vera, Felipe; Campbell, Shama; Wang, Cara; Hodge, Stacey (2014): Off-Hour Delivery Programs. In Eiichi Taniguchi, Russell Thompson (Eds.): *City Logistics*, vol. 2010: CRC Press, pp. 149–166.

IML (2014): Klimafreundlicher Wirtschaftsverkehr. Konzeptstudie für die Region Hannover.

Jaller, Miguel; Sánchez, Sergio; Green, Joanne; Fandiño, Magdalena (2016): Quantifying the Impacts of Sustainable City Logistics Measures in the Mexico City Metropolitan Area. In *Transportation Research Procedia* 12, pp. 613–626. DOI: 10.1016/j.trpro.2016.02.015.

KBA (2018): Fahrzeugzulassungen (FZ) Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern.

LHH (2013): Masterplan 100 % für den Klimaschutz. Endbericht. Auf dem Weg zu einer klimaneutralen Region bis 2050. Hannover.

LHH (2018) Urbane Logistik Hannover. Website der Projektinitiative. <https://www.hannover.de/Urbane-Logistik-Hannover>

Patier, Danièle; Browne, Michael (2010): A methodology for the evaluation of urban logistics innovations. In *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 2 (3), pp. 6229–6241. DOI: 10.1016/j.sbspro.2010.04.033.

Sánchez-Díaz, Iván; Georén, Peter; Brolinson, Märta (2017): Shifting urban freight deliveries to the off-peak hours: a review of theory and practice. In *Transport Reviews* 37 (4), pp. 521–543. DOI: 10.1080/01441647.2016.1254691.

Sustrade, Volker; Schröder, Stefan; Hünefeldt, Stefan (1995). Status-quo-Analyse des Wirtschaftsverkehrs im Grossraum Hannover. Beiträge zur regionalen Entwicklung des Kommunalverbandes Grossraum Hannover. No. 49.

Thompson, Russel G. (2015): Evaluating City Logistic Schemes.. In Eiichi Taniguchi, Russell Thompson (Eds.): *City Logistics*, vol. 2010: CRC Press, pp. 101–114.

Trott, Maik; von Viebahn, Christoph; Auf der Landwehr, Marvin (2018): E-grocery of tomorrow – home delivery of food between profitability, customer acceptance and ecological footprint. Lecture at 3rd VREF Conference on Urban Freight, Gothenburg. 17.-19.10.2018

Van Duin, Ron; Quak, Hans; Muñuzuri, Jesús (2008): Revival of cost benefit analysis for evaluating the city distribution centre concept? In *Innovations in City Logistics*. CRC Press, pp. 97-144.

van Duin, Ron; Muñuzuri, Jesus (2014): Urban Distribution Centers. In Eiichi Taniguchi, Russell Thompson (Eds.): *City Logistics*, vol. 41: CRC Press, pp. 115–134.

van Rooijen, Tariq; Quak, Hans (2014): City Logistics in the European CIVITAS Initiative. In *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 125, pp. 312–325. DOI: 10.1016/j.sbspro.2014.01.1476.

Vastag, Alex; Kirsch, Daniela; Bernsmann, Arnd; Moll, Cornelius; Stockmann, Martin (Eds.) (2017): Potenziale einer geräuscharmen Nachtlogistik. Ergebnisse und Handlungsempfehlungen des Forschungsprojekts GeNaLog : Dezember 2013 - Februar 2015, Juni 2015 - September 2017. Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik; Fraunhofer IRB-Verlag. Stuttgart: Fraunhofer Verlag. Available online at <http://publica.fraunhofer.de/dokumente/N-477670.html>.

Visser, Jesse (2015): Role of the public sector. In Eiichi Taniguchi, Russell Thompson (Eds.): *City Logistics*, vol. 41: CRC Press, pp. 25-40.

Wenzel, Sigrid; Collisi-Böhmer, Simone; Pitsch, Holger; Rose, Oliver; Weiß, Matthias (2008): Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik. Planung und Durchführung von Simulationsstudien. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (VDI-Buch). Available online at <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10216550>.

Wulforth, Gebhart; Priester, Roland; Montserrat, Miramontes (2013): What Cities Want. How cities plan future mobility. MAN Group. London.

Wolpert, Stefan; Reuter, Carsten (2012): Status Quo of City Logistics in Scientific Literature. In *Transportation Research Record* 2269 (1), pp. 110–116. DOI: 10.3141/2269-13.

Automation of Automation – Ein Ansatz für das Engineering von technischen Energiemanagementsystemen

Würger, Andreas; Niemann, Karl-Heinz

Einleitung

Aus dem durch die Bundesregierung beschlossenen Atomausstieg und der damit einhergehenden Energiewende ergibt sich nicht nur ein Verlust an konventionell erzeugter Versorgungsleistung im elektrischen Verbundnetz. Der Umstieg auf regenerative, stark fluktuierende Energieträger wie Wind und Sonne hat zur Folge, dass auch die Menge der erzeugten Energie stark fluktuiert. Dies erfordert Maßnahmen zur Anpassung der Verbrauchsseite an die Erzeugungsseite, z. B. durch ein Energiemanagement in der industriellen Produktion. Das Energiemanagement kann zum einen zu einer Steigerung der Energieeffizienz, z. B. durch das Aufdecken von Energieverschwendung, beitragen. Zum anderen bietet der Einsatz von technischen Energiemanagementsystemen mit Lastmanagementfunktionalitäten die Möglichkeit zum dynamischen Zu- und Abschalten von Energieverbräuchen, was wiederum bei der Anpassung der Energieverbrauchssituation an eine Versorgung mit fluktuierenden Energien hilft.

Technische Energiemanagementsysteme (Kurz tEnMS) sind ein Werkzeug zur Umsetzung des organisatorischen Energiemanagements, wie es in (DIN EN ISO 50001) definiert ist. tEnMS dienen in der industriellen Produktion zum Messen, Speichern und Auswerten von Energieverbräuchen. Es existiert jedoch auch die bereits erwähnte Möglichkeit des Lastmanagements, also zur gezielten Beeinflussung der Energieaufnahme von Produktionsbereichen durch das tEnMS. Die Integration von tEnMS-Komponenten in das Automatisierungssystem der Produktionsanlage bietet hierbei signifikante Vorteile. Ein Lastmanagement wird durch eine derartige Integration erst möglich, weil eine Kopplung zwischen dem tEnMS, welches die Schaltbefehle aus dem Lastmanagement generiert und den SPSen, welche für das Zu- und Abschalten von Feldgeräten verantwortlich sind, erforderlich ist. Durch die Integration von tEnMS und Automatisierungssystem entsteht jedoch auch ein erhöhter Engineering-Aufwand. Dieser Engineering Aufwand resultiert aus der Notwendigkeit von Energie-SPS-Programmen und deren Erstellung. Dieser zusätzliche Engineering Aufwand

wird von industriellen Anwendern als Hemmnis gegen den Einsatz eines tEnMS wahrgenommen (Niemann 2011).

In diesem Beitrag wird ein Konzept vorgestellt, mit dem die in das Automatisierungssystem integrierten tEnMS Komponenten automatisch generiert werden können. Der für die Realisierung der Energiemanagementfunktionen benötigte Engineering Aufwand entfällt damit. Um dieses Konzept vorstellen zu können, wird zunächst eine Einführung in die Automatisierungstechnik und in die Thematik technischer Energiemanagementsysteme gegeben.

Einführung in die Automatisierungstechnik

Die Komponenten die in modernen Automatisierungssystemen zum Einsatz kommen werden gemäß (DIN EN 62264-1) hierarchisch angeordnet. Diese hierarchische Anordnung lässt sich in der sogenannten Automatisierungspyramide, siehe Abbildung 1, darstellen.

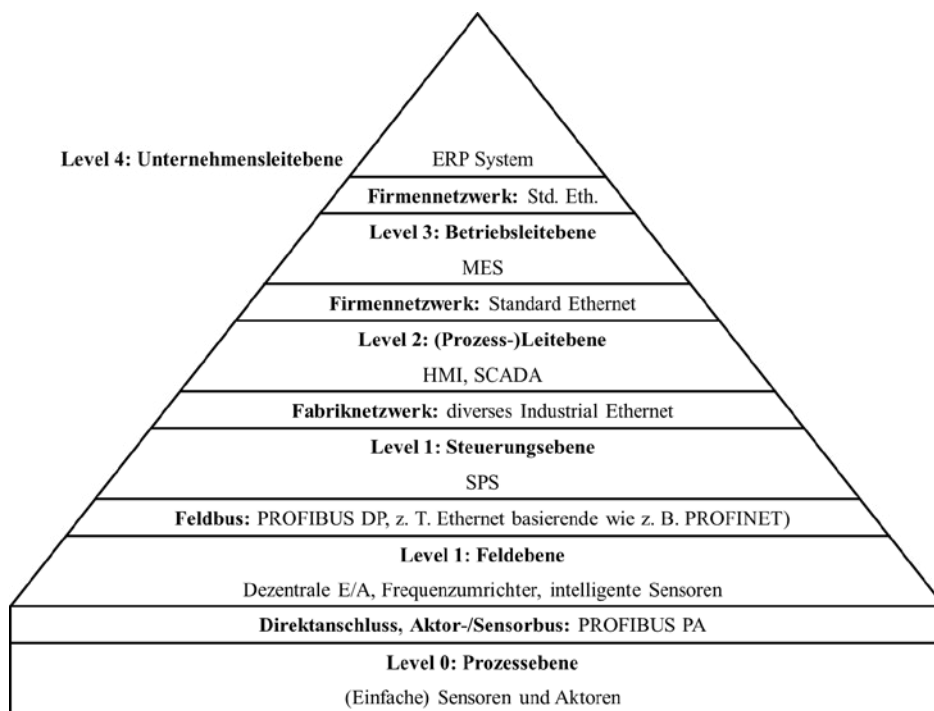


Abbildung 1: Automatisierungspyramide, angelehnt an Bild 1 aus (Würger und Niemann 2018)

Die unterste Ebene der dargestellten Automatisierungspyramide ist die Prozessebene. Hier nehmen einfache Sensoren Messgrößen aus dem, durch das Automatisierungssystem zu beeinflussenden, Prozess auf und einfache Aktoren beeinflussen den Prozess. Die Ebene 1 in der dargestellten Automatisierungspyramide ist zweigeteilt. Der untere Teil der Ebene 1 ist die Feldebene, hier befinden sich Feldgeräte wie z. B. komplexere Sensoren und Aktoren, Frequenzumrichter sowie dezentrale Ein- und Ausgabebaugruppen, welche an die Speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPSen) auf dem oberen Teil der Ebene 1

angeschlossen sind. Der obere Teil der Ebene 1 ist die sogenannte Steuerungsebene. Hier nehmen SPSen die Daten von den Sensoren auf den unteren Ebenen auf, verarbeiten diese gemäß ihres internen Steuerungsprogramms und geben die ermittelten Stellsignale an die angeschlossenen Aktoren aus. Über der Steuerungsebene befindet sich die Prozessleitebene. Hier findet die Interaktion zwischen Automatisierungstechnik und der anlagenbedienenden Person über computergestützte Visualisierungssysteme statt. Auf der Ebene 3 findet in dem sogenannten Fertigungsmanagementsystem (Engl. Manufacturing Execution System, kurz und im Folgenden: MES) die Produktionsfeinplanung statt. Hier werden z. B. Rezepturen und Produktionsfahrweisen verwaltet. Auf der Ebene 4 der dargestellten Automatisierungspyramide findet in dem sogenannten Enterprise Resource Planning System (Kurz ERP System) die Produktionsgrobplanung statt.

Der Datenaustausch zwischen den einzelnen Komponenten erfolgt je nach Ebene durch unterschiedliche Kommunikationstechnologien. Die Heterogenität der Kommunikationssysteme resultiert dabei aus den unterschiedlichen Anforderungen auf den verschiedenen Ebenen. So werden auf den unteren Ebenen der Automatisierungspyramide vergleichsweise geringe Datenmengen in Echtzeit transportiert, wohingegen auf den höheren Ebenen der Automatisierungspyramide größere Datenmengen ohne Echtzeitanforderungen transportiert werden. Dabei findet sich auf den Ebenen 3 und 4 in der Regel Standard Ethernet. Unterhalb der Ebene 3 bis zur Steuerungsebene findet sich Industrial Ethernet. Ein aktuell stark an Bedeutung gewinnendes Industrial Ethernet Protokoll, welches hauptsächlich zum Datenaustausch zwischen SPSen und Systemen gleicher oder höherer Ebene verwendet wird, ist OPC UA (Lange et al. 2010). Der Anschluss von intelligenten Sensoren und Aktoren, sowie von dezentralen E/A-Ebenen an die SPSen erfolgt über Feldbussysteme wie z. B. PROFIBUS. Wobei Ethernet-basierende Feldbussysteme wie z. B. PROFINET immer mehr an Bedeutung gewinnen und konventionelle Feldbussysteme ablösen (Klasen et al. 2010). Der Anschluss von einfachen Sensoren und Aktoren an die SPSen erfolgt entweder direkt oder über einen sogenannten Aktor-/ Sensorbus.

Einführung in das technische Energiemanagement

Es ist prinzipiell möglich ein technisches Energiemanagementsystem in der industriellen Produktion parallel zu den Komponenten und Strukturen der Automatisierungstechnik, wie im vorherigen Kapitel beschrieben, aufzubauen. In diesem Fall wird eigens Zähler- und Messhardware für das tEnMS installiert. Die Messwerte werden über ein separates, eigens für

das tEnMS installiertes, Kommunikationssystem an eine oder mehrere ebenfalls eigens für das tEnMS installierte SPSen übertragen. Die Messwerte werden in den SPSen aufbereitet und für das übergeordnete System zum Speichern, Auswerten und Darstellen von Energiedaten über Industrial Ethernet bereitgestellt. Ein Lastmanagement ist bei einem derartigen Systemaufbau nicht möglich, da hierfür eine Kopplung zwischen dem tEnMS, welches den Schaltbefehl aus dem Lastmanagement generiert, und den SPSen, welche die Ansteuerung von Verbrauchern im industriellen Umfeld übernehmen, vorhanden sein muss.

Im Gegensatz zu den parallelen Strukturen von tEnMS und Automatisierungssystem bietet eine Integration von tEnMS und Automatisierungssystem Vorteile. So können vorhandene Kommunikationsstrukturen für den Transport von Messwerten von den Zählern/ Messgeräten bis zur Steuerungsebene genutzt werden. Für die Aufnahme, Aufbereitung und Bereitstellung der Messwerte können in diesem Fall die SPSen, welche auch die Automatisierungsaufgaben übernehmen, verwendet werden. In diesen SPSen werden dann zusätzlich zu den Automatisierungs-SPS-Programmen Energie-SPS-Programme ausgeführt. Hieraus ergibt sich der Vorteil, dass Energie- und Automatisierungs-SPS-Programme miteinander gekoppelt sind, wodurch wiederum die Realisierung eines aktiven Lastmanagements möglich wird. Den Energie-SPS-Programmen übergeordnet befindet sich, auch bei dem integrierten Aufbau des tEnMS, wieder ein System zum Speichern, Auswerten und Darstellen von Energiedaten. Dieses System lässt sich nun auf Ebene 3 der Automatisierungspyramide, parallel zum MES, oder integriert in dieses, verorten (VDI 5600 Blatt 6).

Ein noch höherer Integrationsgrad von tEnMS und Automatisierungssystem kann durch den Einsatz von Feldgeräten mit integrierten Energieschnittstellen erreicht werden. Derartige Feldgeräte existieren heute bereits. Bei den integrierten Energieschnittstellen handelt es sich um integrierte Messungen sowie um Schnittstellen über welche die Geräte in energiesparende Betriebsmodi versetzt werden können. Bereitgestellt werden derartige Energieschnittstellen über sogenannte Energieprofile für Feldbussysteme wie z. B. PROFIenergy (PROFIBUS Nutzerorganisation e. V. (PNO) 2010) für PROFINET. In den Energie-SPS-Programmen kann dann auf die über die Energieprofile bereitgestellten Energieschnittstellen zugegriffen werden. Ein durch den Einsatz von Energieprofilen hoch integriertes tEnMS wird in Abbildung 2 zusammen mit der Automatisierungspyramide dargestellt. In der Abbildung werden die Systemkomponenten auf MES Ebene als das eigentliche tEnMS bezeichnet, die Systemkomponenten auf Steuerungsebene werden als Energie-SPS-Programme bezeichnet.

Diese Bezeichnungen werden zur Unterscheidbarkeit der beiden Systemkomponenten auf MES- und auf SPS-Ebene für den restlichen Beitrag beibehalten.

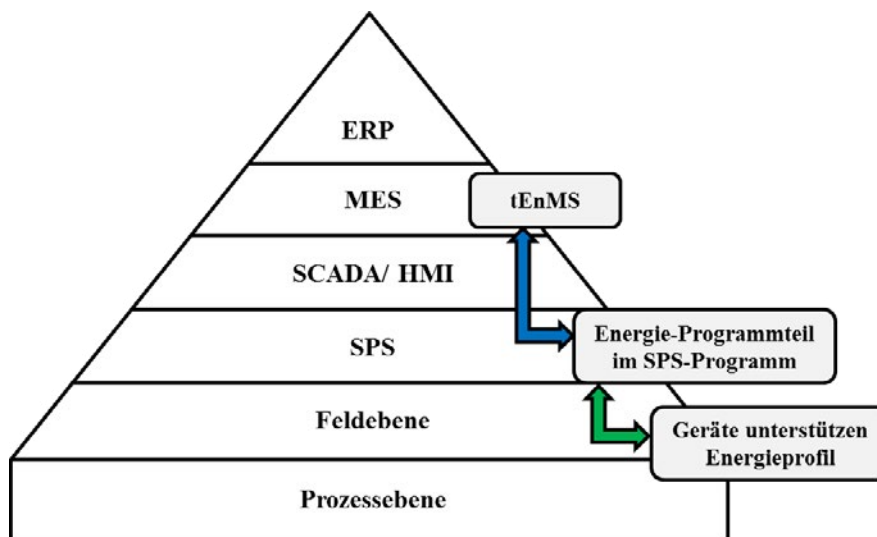


Abbildung 2: Integriertes tEnMS, angelehnt an Abbildung 1 aus (Würger et al. 2018b)

Anforderungen industrieller Anwendern

In (Niemann 2011) und (Güldner und Menze 2014) wird die Verbreitung und die Akzeptanz integrierter tEnMS bei industriellen Anwendern untersucht. Beide Studien kommen dabei zu dem Schluss, dass der mit der Integration des tEnMS verbundene Engineering Aufwand eines der größten Hemmnisse industrieller Anwender gegen den Einsatz von tEnMS darstellt.

Eine Marktanalyse, welche mit Hilfe des Marktspiegels der Energieagentur NRW (Energieagentur NRW 2017) durchgeführt wurde, ergab, dass am deutschsprachigen Markt derzeit über 90, als technische Energiemanagementsysteme bezeichnete, Systeme angeboten werden. Bei der überwiegenden Mehrheit dieser Systeme handelt es sich um Softwarelösungen, welche den im vorigen Kapitel als tEnMS auf MES-Ebene bezeichneten Systemen ähneln. Die angebotenen Systeme verfügen über eine Datenbank zur Speicherung von Messwerten und über Softwarekomponenten zum Auswerten und Darstellen von Energiedaten. Die Messwerte können diesen Systemen über Import-Schnittstellen, wie z. B. CSV-Import, oder über dynamische Schnittstellen wie z. B. über das Industrial Ethernet Protokoll OPC UA zugeführt werden.

Vorgefertigte Lösungen für die tEnMS Komponenten unterhalb der MES-Ebene werden auf dem deutschsprachigen Markt kaum angeboten. Das fortschrittlichste Produkt ist hierbei die *SIMATIC Energy Suite* der Firma Siemens (Siemens AG 2016). Hierbei handelt es sich um ein Engineering Werkzeug, mit welchem SPS-Programme für die Aufnahme von Messwerten

teilweise automatisch generiert werden können. Die Messgeräte, welche die Messwerte liefern, müssen vorab manuell in der Software konfiguriert werden. Das Produkt hat allerdings einige Nachteile:

- Es können nur einige Messgeräte aus dem Produktportfolio der Herstellerfirma konfiguriert werden.
- Ein Anschluss von Energieprofil unterstützenden Feldgeräten ist bisher nicht vorgesehen.
- Es existieren bisher nur Messfunktionalitäten und kein Lastmanagement.
- Die generierten SPS-Programme können nur in Steuerungen der Herstellerfirma importiert werden.

Seitens industrieller Anwender existiert also ein akuter Bedarf an möglichst hersteller-neutralen Lösungen für tEnMS-Komponenten auf Steuerungsebene, mit denen sich der, für die Integration von tEnMS und Automatisierungssystem, benötigte Engineering-Aufwand auf ein Minimum begrenzen lässt.

Konzept für ein integriertes tEnMS

Das Forschungsprojekt¹ „Integriertes Anlagenengineering zur Erhöhung der Energieeffizienz IAE⁴“, welches von Oktober 2014 bis Januar 2019 an der Hochschule Hannover durchgeführt wird, hat die vorwettbewerbliche Entwicklung eines integrierten tEnMS, welches die im vorherigen Kapitel herausgearbeiteten Anforderungen industrieller Anwender erfüllt, zum Ziel. Das im Rahmen des IAE4 Forschungsprojektes entwickelte tEnMS, im Folgenden als IAE4-System bezeichnet, ist auf Abbildung 3 dargestellt.

Die Integration des IAE4-Systems erfolgt in ein Referenz-Automatisierungssystem, welches auf der Abbildung von dem grauen Rahmen mit der Beschriftung *Laufzeitsystem* umschlossen wird. Dieses System besteht aus l bis n SPSen, welche mit dem SPS-Engineering-Werkzeug Codesys V3 (Vogel-Heuser und Wannagat 2009) projektiert werden. Bei Codesys V3 handelt es sich um ein zur IEC 61131-3 (DIN EN 61131-3) konformes SPS-Engineering-Werkzeug. In der IEC 61131-3 ist die herstellernerneutrale Programmierung von SPSen definiert. Jede dieser SPSen verfügt über einen integrierten OPC UA Server, über welchen Daten für übergeordnete Systeme bereitgestellt werden können. An jede der SPSen sind über PROFINET l bis m PROFInergy fähige Feldgeräte angeschlossen. Den SPSen überlagert befindet sich ein OPC UA Aggregationsserver, welcher die Aufgabe hat die Energiedaten von allen SPSen

¹ Förderkennzeichen: ZN2948; Forschungsprofessur des Landes Niedersachsen/ Volkswagenstiftung

aufzunehmen, diese in einer sinnvollen Struktur anzuordnen und für das übergeordnete tEnMS auf MES-Ebene bereit zu stellen.

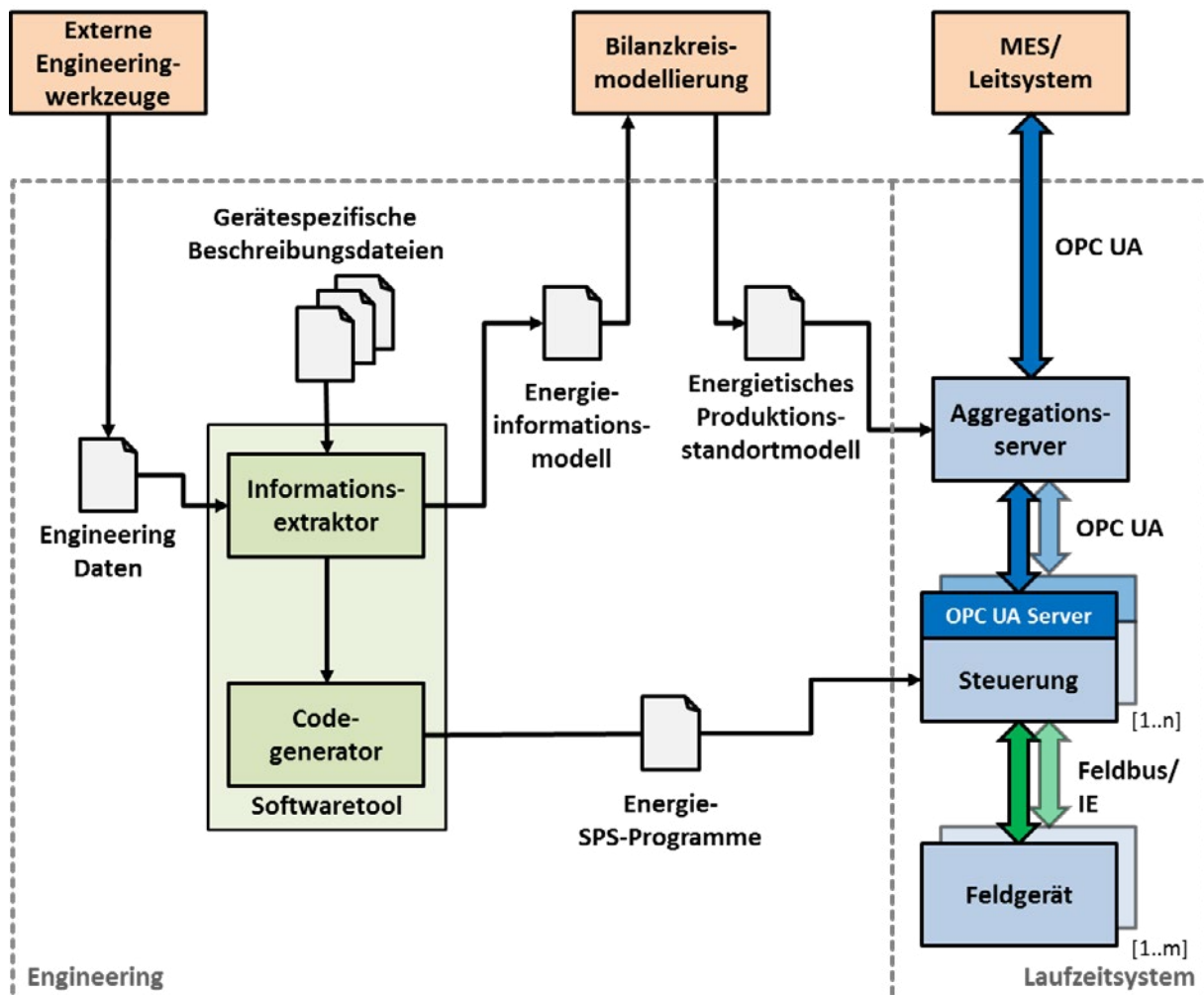


Abbildung 3: IAE4-System, angelehnt an (Würger et al. 2018b)

Um Engineering-Aufwand bei der Integration des tEnMS möglichst zu vermeiden, wurde ein Softwaretool gestützter Engineering-Workflow entwickelt. Das Engineering-Softwaretool generiert hierbei die Energie-SPS-Programme automatisch. (Würger et al. 2018a)

Die für die automatische Codegenerierung benötigten Informationen werden dabei automatisch aus Engineering Daten und aus den gerätespezifischen Beschreibungsdateien der an die SPS angeschlossenen Feldgeräte extrahiert. Die extrahierten Informationen werden neben der Verwendung innerhalb des Codegenerators, auch noch in einem sogenannten *Energieinformationsmodell* zusammengefasst. Dieses Energieinformationsmodell enthält nun alle SPS bezogenen Energieinformationen. (Würger et al. 2018b)

Die Energieinformationsmodelle aller Steuerungen werden anschließend gebündelt und in hierarchische Bilanzkreise strukturiert. Hieraus resultiert ein sogenanntes *Energetisches Produktionsstandortmodell*. In diesem Modell sind nun alle Feldgeräte mit integrierten

Messstellen und Lastmanagementschnittstellen enthalten und in einer sinnvollen Struktur angeordnet. Ein Bilanzkreis ist in (VDI 4602 Blatt 1) definiert als eine Zusammenfassung von Energieeinspeise und/ oder Energieverbrauchsstellen. Ein Bilanzkreis kann beliebige Unterbilanzkreise enthalten. Im Kontext eines Produktionsstandortes wäre also ein Bilanzkreis beispielsweise eine Produktionslinie, die als Unterbilanzkreise die einzelnen Produktionsanlagen enthält.

Als letzter Schritt in dem teilautomatisierten Engineering Workflow wird dieses energetische Produktionsstandortmodell in einen Adressraum für den OPC UA Aggregationsserver transformiert. Bei der Kommunikation über OPC UA stellt ein sogenannter OPC UA Server Daten und Dienste für sogenannte OPC UA Clients zur Verfügung. Die Daten und Dienste befinden sich dabei in dem sogenannten Adressraum des OPC UA Servers. Innerhalb dieses Adressraumes können die Daten und Dienste beliebig angeordnet werden, sodass es möglich ist beliebige strukturelle Elemente zu modellieren. In dem hier vorgestellten Anwendungsfall wird eine Client-Applikation, welche auf den OPC UA Server zugreift, also die von dem Server bereitgestellten Daten und Dienste in der, durch das Energetische Produktionsstandortmodell, vorgegebenen Struktur aus Bilanzkreisen vorfinden.

Zusammengefasst besteht der teilautomatisierte Engineering-Workflow, der im Rahmen des IAE4-Forschungsprojektes entwickelt wurde, aus den folgenden Schritten in der dargestellten Reihenfolge:

- Einlesen von Engineering-Daten und gerätespezifischen Beschreibungsdateien.
- Extrahieren und Speichern von enthaltenen Energieinformationen.
- Automatische Generierung von Steuerungscode aus den gespeicherten Energieinformationen.
- Bündelung der SPS bezogenen Energieinformationen in einem Energieinformationsmodell.
- Zusammenfassung aller Energieinformationsmodelle; Strukturierung der enthaltenen Informationen in Bilanzkreise → Energetisches Produktionsstandortmodell entsteht.
- Transformieren des energetischen Produktionsstandortmodells in einen OPC UA Adressraum für den Aggregationsserver.

Bewertung und Ausblick

Im Rahmen des IAE4 Forschungsprojektes konnte gezeigt werden, dass es möglich ist, die tEnMS-Komponenten unterhalb der MES-Ebene automatisch zu generieren. Die hierfür benötigten Informationen werden automatisch aus Engineering Daten und den gerätespezifischen Beschreibungsdateien der angeschlossenen Feldgeräte extrahiert. Die entwickelten Konzepte wurden an der Hochschule Hannover auf einem experimentellen Testsystem validiert. Dieses Testsystem stellt ein minimales IAE Laufzeitsystem, bestehend aus einer Steuerung mit einem angeschlossenen PROFIenergy-fähigen Feldgerät dar. Die Steuerung wird dabei durch einen Raspberry 2 Einplatinencomputer (Raspberry Pi Foundation), auf dem eine Codesys V3 Soft-SPS läuft, realisiert. Das PROFIenergy-fähige Feldgerät wird durch eine Software realisiert, welche ein PROFIenergy-fähiges Feldgerät emuliert. Diese Software läuft auf einem Standard Windows PC.

Für die Anwendbarkeit des entwickelten Engineering-Workflows bestehen allerdings die folgenden Anforderungen an das Automatisierungssystem, in welches die automatisch generierten tEnMS Komponenten integriert werden sollen:

- Die eingesetzten SPSen wurden mit einer IEC 61131-3 konformen Engineering Umgebung wie z. B. Codesys V3 projektiert.
- Alle eingesetzten SPSen verfügen über einen integrierten OPC UA Server.
- Alle aus Energiesicht relevanten Feldgeräte sind über PROFINET an die SPSen angeschlossen.
- Alle aus Energiesicht relevanten Feldgeräte unterstützen das PROFIenergy Energieprofil.

Insbesondere die letzten beiden Punkte werden von heutigen Automatisierungssystemen häufig noch nicht erfüllt, da hierfür ein durchgängiger Einsatz von Ethernet basierenden Feldbussystemen erforderliche wäre. Allerdings wurde auch gezeigt, dass konventionelle Feldbusinfrastrukturen sukzessive durch Ethernet basierende Feldbussysteme wie PROFINET abgelöst werden. Hierdurch bekommen die im IAE4 Projekt entwickelten Konzepte eine hohe Relevanz für zukünftige Produktionsumgebungen.

Literaturverzeichnis

Energieagentur NRW (2017): Marktspiegel Energiemanagementsysteme. Hg. v. Energieagentur NRW. Online verfügbar unter http://energiertools.ea-nrw.de/images/pdf/ems_741082510022017_10_02_2017.pdf, zuletzt geprüft am 10.02.2017.

VDI 4602 Blatt 1, Oktober 2007: Energiemanagement Begriffe.

DIN EN ISO 50001, 2011-12: Energiemanagementsysteme - Anforderung mit Anleitung zur Anwendung.

VDI 5600 Blatt 6, Juni 2016: Fertigungsmanagementsysteme (Manufacturing Execution Systems – MES): Energiemanagement mit MES.

Güldner, Florian; Menze, Thomas (2014): ARC Advisory Group - Energy Management Online Survey The Findings. ARC Advisory Group, 2014.

DIN EN 62264-1, Juli 2014: Integration von Unternehmensführungs- und Leitsystemen – Teil 1: Modelle und Terminologie.

Klasen, Frithjof; Oestreich, Volker; Volz, Michael (2010): Industrielle Kommunikation mit Feldbus und Ethernet. Berlin: VDE-Verlag.

Lange, Jürgen; Iwanitz, Frank; Burke, Thomas J. (2010): OPC: Von Data Access bis Unified Architecture. 4. Aufl. Berlin, Offenbach: VDE-Verlag.

Niemann, Karl Heinz (2011): Bestandsaufnahme von Energiemanagementfunktionen in Automatisierungssystemen. Studie für den Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie (ZVEI). Hg. v. ZVEI. Hannover. Online verfügbar unter <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:960-opus4-11393>, zuletzt geprüft am 15.11.2017.

PROFIBUS Nutzerorganisation e. V. (PNO) (2010): PI White Paper: The PROFIenergy Profile. Increasing the Energy Efficiency of Automation Systems using Smart Energy Management over PROFINET. Hg. v. PROFIBUS Nutzerorganisation e. V. (PNO). 76131 Karlsruhe. Online verfügbar unter <http://www.profibus.com/nc/download/brochures-white-paper/downloads/pi-white-paper-the-profienergy-profile/display/>, zuletzt geprüft am 02.05.2017.

Raspberry Pi Foundation (Hg.): Raspberry Pi 2 Model B. Online verfügbar unter <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-2-model-b/>, zuletzt geprüft am 06.07.2018.

Siemens AG (Hg.) (2016): SIMATIC Energy Suite. Energietransparenz einfach und integriert. 90026 Nürnberg. Online verfügbar unter <https://c4b.gss.siemens.com/resources/images/articles/dffa-b10170-00.pdf>, zuletzt geprüft am 17.02.2017.

DIN EN 61131-3, Juni 2014: Speicherprogrammierbare Steuerungen – Teil 3: Programmiersprachen.

Vogel-Heuser, Birgit; Wannagat, Andreas (2009): Modulares Engineering und Wiederverwendung mit Codesys V3. Für Automatisierungslösungen mit objektorientiertem Ansatz. München: Oldenbourg Industrieverlag GmbH.

Würger, Andreas; Niemann, Karl-Heinz (2018): Einfluss von Industrie 4.0 auf die Anwendbarkeit von Lastmanagement in der industriellen Produktion. In: Tagungsband AALE 2018. Köln, 01. - 02.03.2018, S. 55–66.

Würger, Andreas; Niemann, Karl-Heinz; Fay, Alexander (2018a): Automatische Codegenerierung für Automatisierungssysteme in Energiemanagementanwendungen. In: Verein deutscher Ingenieure e. V. (Hg.): Automation 2018. Automation. Baden Baden, 03. - 04.07.2018. Verein deutscher Ingenieure e. V., S. 959–971.

Würger, Andreas; Niemann, Karl-Heinz; Fay, Alexander (2018b): Modellierung von Informationen für das Energiemanagement automatisierungstechnischer Anlagen. In: Ulrich Jumar und Christian Diedrich (Hg.): Entwurf komplexer Automatisierungssysteme. Entwurf komplexer Automatisierungssysteme. Magdeburg, 02. - 03.05.2018.

Ansätze zur Strömungsanalyse einer Rotationskompressionskältemaschine

Cui, Bin; Gottschlich, Martin; Lüdersen, Ulrich

Einleitung

Neben dem von der Bundesregierung 2016 verabschiedeten Klimaschutzplan 2050 zur Erreichung einer Treibhausneutralität hat die Europäische Union weitere Maßnahmen zur Reduzierung der Emissionen von fluorierten Treibhausgasen (F-Gasen), einschließlich Fluorkohlenwasserstoffe (H-FKW), zum Umweltschutz vollzogen. Eine davon ist die sogenannte „F-Gas-Verordnung“, welche hauptsächlich die Ziele zur Verhinderung von Leckagen in Geräten die F-Gase enthalten und die Vermeidung der Verwendung von F-Gasen, wenn ökologisch überlegene Alternativen kosteneffektiv sind, verfolgt. Konkret sollen die Maßnahmen durch folgende Änderungen erfolgen (Europäische Kommission 2018):

- Schrittweise Reduzierung der seit 2014 in der EU in den Verkehr gebrachten Mengen von H-KFW, bis zum Jahr 2030 um 79%.
- Verbot von F-Gasen in Neugeräten, bei denen weniger schädliche Alternativen verbreitet sind, wie Kühlschränke in Haushalten oder Supermärkten, Klimaanlage, etc.
- Vermeidung von Emissionen der F-Gase aus bestehenden Anlagen durch Kontrollen und Wartungen.

Besonders in der Raumklimatisierung ist festzustellen, dass sowohl natürliche als auch neue Ersatzkältemittel noch nicht weit verbreitet sind. Die Neuentwicklung der Rotationskompressionskältemaschine bietet die Möglichkeit eine umweltfreundliche Alternative zu herkömmlichen Anlagen zu schaffen, welche z.B. Luft als Kältemittel verwenden kann. Sie zeichnet sich durch einen wartungsarmen Betrieb mit einem ressourcen-unlimitierten Medium aus und trägt zum Erreichen der klimapolitischen Ziele zur Senkung der Treibhausgasemissionen bei.

Im Folgenden wird der Stand der Technik zu herkömmlichen Kälteprozessen erläutert und die Funktionsweise sowie die Vorteile der Rotationskompressionsmaschine dargestellt. Des Weiteren werden erste Simulationsergebnisse und ein Ausblick über die zukünftige Forschung zur Systemanpassung der Maschine gegeben. Es handelt sich hierbei zunächst um eine Voruntersuchung.

Stand der Technik

Kälteprozesse

Die aktive Kälteerzeugung kann in drei thermodynamische Prozesse unterteilt werden. Beim Kompressionskälteprozess wird mechanische Energie zugeführt, der Sorptionskälteprozess nutzt Wärmeenergie und der thermoelektrische Kälteprozess nutzt elektrische Energie zur Erzeugung von Kälte. Als Kennzahl zur Bewertung der Leistung wird das Verhältnis der Kühlleistung zur effektiven Leistungsaufnahme, auch Leistungszahl genannt, angegeben und im Englischen auch als energy efficiency ratio oder kurz EER bezeichnet (AMEV- Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltungen 2017, S. 5). Eine Übersicht mit den Vor- und Nachteilen der entsprechenden Kältemaschinen ist in Tabelle 1 zu finden.

Tabelle 1: Übersicht gängiger Kältemaschinen

Kältemaschine	Vor- & Nachteile	
Kompressionskältemaschine	+ Geschlossener Kreislauf → keine nennenswerte Kältemittelverluste + Hoher EER + Viele Anwendungsbereiche	- Hoher Energieverbrauch - Hohes GWP der Kältemittel - Fluorierte Kältemittel sind nicht zukunftssicher
Absorptionskältemaschine	+ Geringerer Wartungsaufwand gegenüber Kompressionskältemaschinen + Kein Einsatz von FCKW oder FKW + Geringer Strombedarf + Hohe Lebensdauer	- Hohe Anschaffungskosten - Ammoniak als Kältemittel (stark toxisch) - Hoher Wärmeenergiebedarf - großer apparativer Aufwand
Adsorptionskältemaschine	+ Geringerer Wartungsaufwand gegenüber Kompressionskältemaschinen + Kein Einsatz von FCKW oder FKW + Geringer Strombedarf + Hohe Lebensdauer	- Vakuum notwendig - Hohe Anschaffungskosten - Zyklische Betriebsweise - Hoher Wärmeenergiebedarf - Großer apparativer Aufwand
Klimaanlage (Split-Geräte)	+ Einsatz als Wärmepumpe möglich	- Außen- und Inneneinheit nötig - Elektrischer Energiebedarf - Bisher keine alternativen Kältemittel für bestehende Anlagen (Umrüsten nicht möglich)

mögliche Alternativen	<ul style="list-style-type: none"> • CO₂-Anlagen • Kaltluftklimaanlage ICE-3
------------------------------	---

Im Bereich der Gebäudeklimatisierungen stehen weltweit nur wenige Systeme zur Verfügung, die ohne umweltschädigende Kältemittel arbeiten und dennoch gute Leistungszahlen vorweisen. Neben den FCKWs gibt es sogenannte natürliche Kältemittel, die kein Ozonzerstörungspotential besitzen. Dazu zählen Kohlendioxid, Ammoniak, Kohlenwasserstoffe und Wasser. Sorptionskälteanlagen arbeiten hauptsächlich mit natürlichen Kältemitteln, haben allerdings einen hohen apparativen Aufwand und somit hohe Investitionskosten. Anlagen die CO₂ verwenden, erreichen sehr gute Leistungszahlen, müssen aber für Drücke bis zu 120 bar ausgelegt sein, um im subkritischen Bereich von Kohlendioxid arbeiten zu können. Des Weiteren sind besondere Schutzmaßnahmen, wie z.B. CO₂-Warnanlagen, notwendig. Die Kompressionskälteanlagen sind derzeit die am häufigsten genutzten Anlagen zur Bereitstellung von Kälte. Ihr wesentlicher Vorteil ist ein hoher EER zwischen drei und fünf, der nur durch einen Phasenübergang des Arbeitsstoffes erreicht werden kann. Im Wesentlichen bestehen sie aus einem Verdichter, einem Verflüssiger, einer Drossel und einem Verdampfer. Das Kältemittel zirkuliert im geschlossenen Kreislauf. Aktuelle Kältemittel in Klimageräten, die entsprechende Anforderungen nicht erfüllen, werden aufgrund ihrer unzureichenden Umweltverträglichkeit durch die F-Gas-Verordnung schrittweise reduziert (Parlanti 2016, S. 3–44).

Dem hohen EER und den unterschiedlichen Anwendungsbereichen steht ein hoher GWP gegenüber. Es wird unter Zuhilfenahme der Schukey-Technologie eine Kältemaschine entwickelt, die den Vorteil hat, Luft als natürliches Kältemittel mit einem GWP von null verwenden zu können.

Rotationskompressionskältemaschine

Die Hochschule Hannover hat im von der Europäischen Union geförderten Projekt Micro-Trigeneration die Schukey-Maschine untersucht und weiterentwickelt. Dabei sind zwei Prototypen gebaut und im Laborprüfstand getestet worden. In diesen Versuchen ist die Schukey-Maschine als Turbine zur Expansion von Dampf betrieben und deren Leistung über eine Wirbelstrombremse abgeführt worden. Weiterhin konnte ein Prototyp erfolgreich in einer Demonstrationsanlage bei der Stadtentwässerung Hildesheim zur Erzeugung von 5kW elektrischer Leistung aus Abgas implementiert werden. Beide Prototypen haben in diesen

Anlagen ihre Funktionstüchtigkeit für die Expansion von Dampf zur Gewinnung von elektrischer Energie nachgewiesen.

In Anwendung auf den Kälteprozess konnte das Funktionsprinzip der Rotationsmaschine bereits in unterschiedlichen Gutachten nachgewiesen werden (PLANET 1993; Dittmann 1995; Dittmann und Heinze 1993). Mit den Eigenschaften der Gase, sich bei Kompression zu erwärmen und bei Expansion abzukühlen, bietet die atmosphärische Luft Potential als Kältemittel. Der Vorteil von Luft als Kältemittel ist, dass ein kostengünstiges, einfach handhabbares und unbegrenzt aus der Umgebung verfügbares Arbeitsmittel verwendet wird, welches weder giftig, brennbar noch explosiv ist (Schmidt 2000). Berechnungen ergeben eine Leistungszahl der Rotationskompressionskältemaschine von $EER=0,9$ bei einer Kälteleistung von 1-3 Kilowatt (Randbedingung: Kühlung von 35° warme Luft auf 9° bei 1000 U/min). Das ermöglicht eine Steigerung der Energieeffizienz um bis zu 30 % gegenüber gängiger Sorptionskälteanlagen.

Prinzip der Rotationskompressionskältemaschine

Das Funktionsprinzip der Schukey-Technologie basiert auf einer rotierenden Arbeitsmaschine. Zwei sich gegenüberstehende, ineinandergreifende Flügelräder bilden dabei acht rotierende Kammern für das Arbeitsmedium. Die Rotationsbewegung der Flügelräder wird durch ein Getriebe so geführt, dass sich die Umlaufgeschwindigkeiten zueinander relativ verändern und eine charakteristische oszillierende Bewegung entsteht. Je nach Anordnung der Ein- und Auslässe, resultiert aus dieser Bewegung eine Kompression oder Expansion des Arbeitsgases. Das Öffnen und Schließen wird ohne gesteuerte Ventile umgesetzt und geschieht alleinig durch die Position der Rotorflügel. Es erfolgt ein hoher Volumendurchsatz mit 32 Kammerfüllungen pro Umdrehung. Abbildung 1 zeigt den Aufbau der Schukey-Maschine.

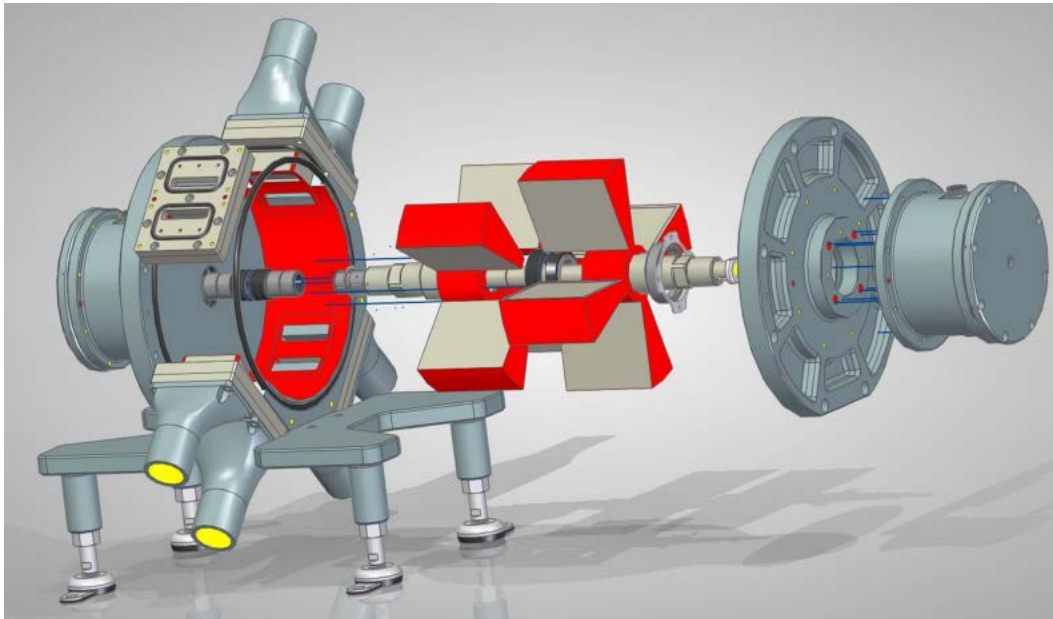


Abbildung 1: Aufbau der Schukey Maschine in Modellansicht

In Abbildung 2 ist das Funktionsprinzip der Schukey-Technologie eines Expansionsvorgangs dargestellt. Im ersten Schritt folgt die Befüllung der Kammer durch das eintretende Arbeitsmedium. Daraufschließend schließt Rotor 2 (blau) den Einlass, Rotor 1 (grün) beginnt sich schneller zu drehen als Rotor 2 und es kommt in Schritt 2 zur Expansion. Rotor 1 erreicht dabei die höchste Winkelgeschwindigkeit und nimmt im Anschluss, aufgrund des Getriebes, wieder eine langsamere Geschwindigkeit an. Zeitgleich beginnt Rotor 2 wieder zu beschleunigen. Das Arbeitsmedium wird an dieser Stelle durch den wieder beschleunigenden Rotor 2 am Auslassstutzen ausgestoßen.

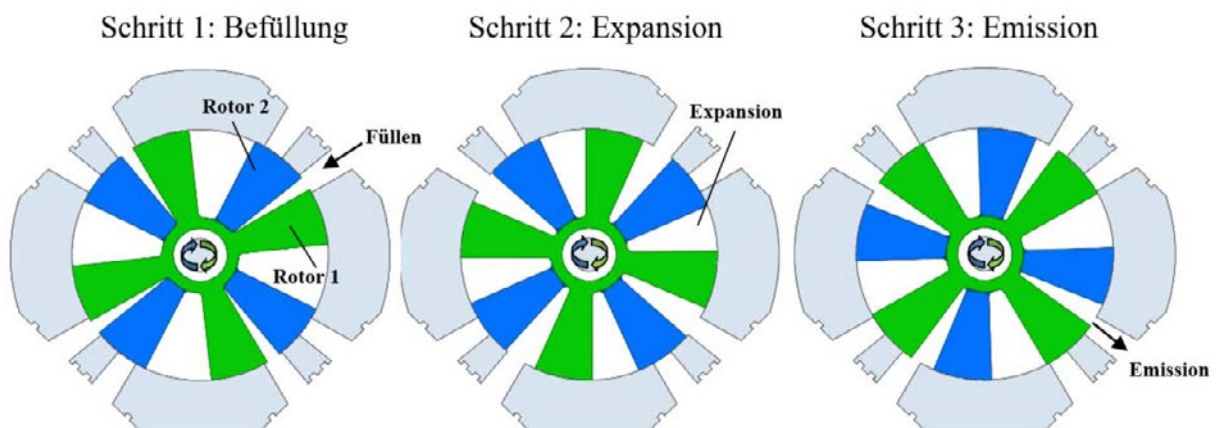


Abbildung 2: Funktionsprinzip der Schukey-Technologie anhand des Expansionsprozesses

Die charakteristische Bewegung der Rotoren ist anhand von Messungen ermittelt worden und kann durch eine Winkelfunktion beschrieben werden. Abbildung 3 zeigt den Funktionsverlauf der beiden Rotoren entlang einer Winkelumdrehung. Aus der Abbildung geht hervor, dass sich die beiden Rotoren phasenverschoben um 90° entlang der Hauptwelle drehen. Anhand der

Maxima und Minima lassen sich die 4 Prozessschritte einer Kammer erkennen. Da insgesamt 8 Kammern vorliegen, kommt es hier wie bereits erwähnt zu 32 Kammerfüllungen.

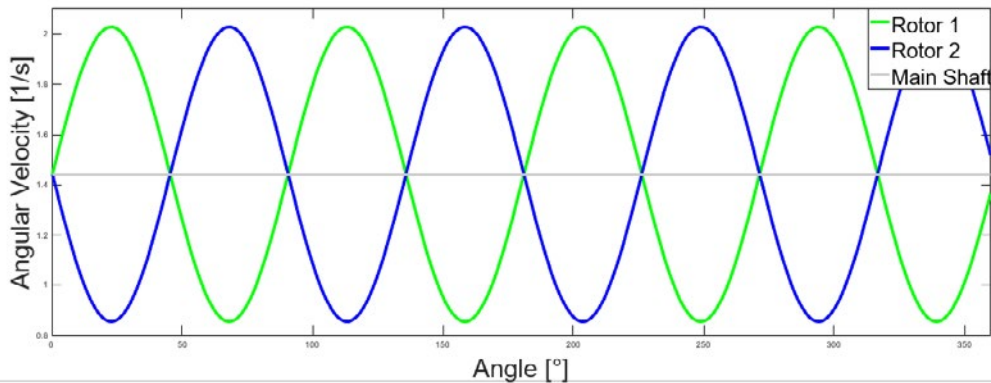


Abbildung 3: Winkelgeschwindigkeiten der beiden Rotoren (Rotor 1: grün; Rotor 2: blau; Hauptwelle: grau) entlang einer Umdrehung

Thermodynamischer Kreisprozess

Der thermodynamische Kreisprozess zur Kälteerzeugung mit der Rotationskompressionskältemaschine ist in Abbildung 4 dargestellt und verläuft in drei Prozessschritten.

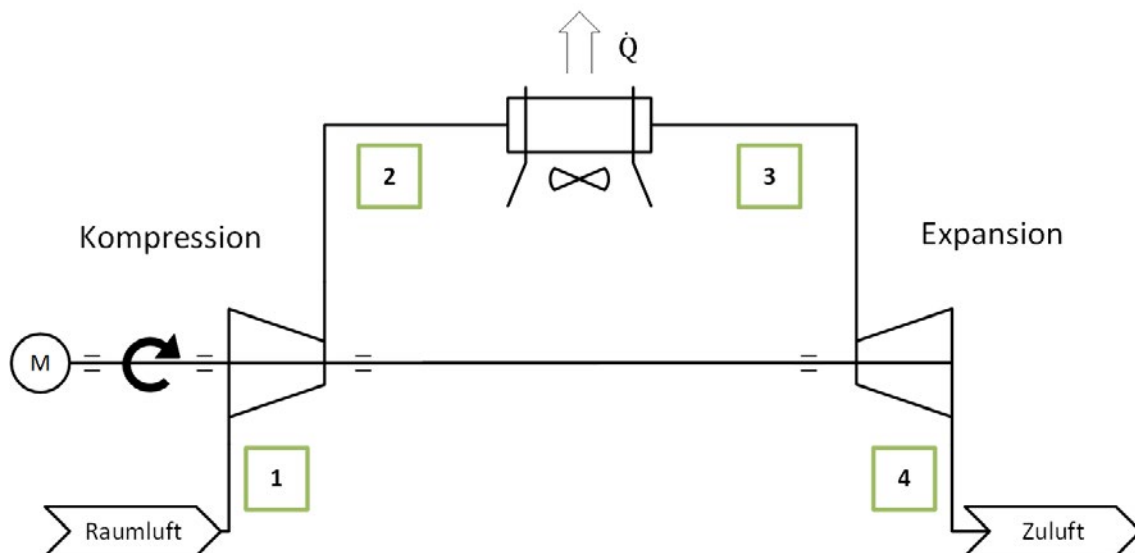


Abbildung 4: Prinzip der Rotationskältemaschine im Verfahrensfliessbild

Die warme Raumluft wird von der Maschine angesaugt und von [1] nach [2] komprimiert. Dadurch erhöhen sich Lufttemperatur und Luftdruck auf den Zustand [2]. Durch die erhöhte Temperatur kann die Luft innerhalb eines Wärmeübertragers von [2] nach [3] heruntergekühlt werden. Der Druck der Luft bleibt dabei konstant. Im dritten und letzten Prozessschritt von [3] nach [4] findet eine Expansion der Luft statt. Temperatur und Druck sinken während der

Expansion auf einen Zustand [4] mit niedrigerer Temperatur als zuvor in [1] ab. Die gekühlte Luft kann schließlich als Zuluft in den Raum geführt werden.

Die Prozessschritte von [1] nach [4] sind in Abbildung 3 im T,s-Diagramm dargestellt. Dabei finden folgende Prozessübergänge statt:

- [1] → [2] isentrope Kompression
- [2] → [3] isobare Abkühlung
- [3] → [4] isentrope Expansion
- [4] → [1] isobare Erwärmung

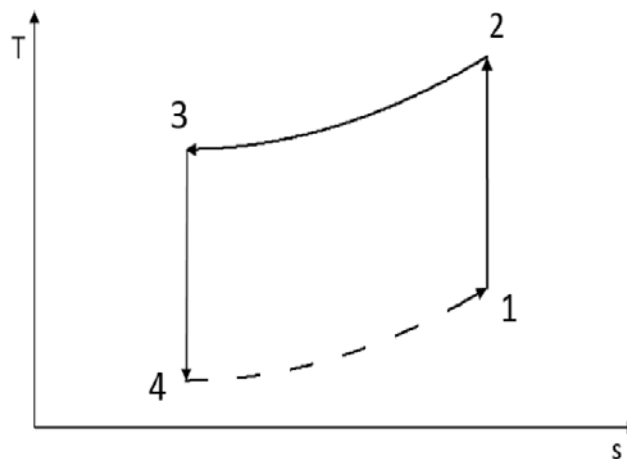


Abbildung 5 Kälteprozess der Rotationskompressionsmaschine im T,s-Diagramm

Für den Idealfall und zur Beschreibung des Kreisprozesses wird eine isentrope Kompression und Expansion angenommen. Dies ist in der Realität nicht der Fall, da innerhalb der Maschine in den zwei Vorgängen Verluste auftreten. Real handelt es sich dabei um polytrope Zustandsänderungen. Prozessschritt [4] nach [1] findet nicht im geschlossenen Kreisprozess statt. An dieser Stelle erwärmt sich die Zuluft wieder im Raum und kann als Raumluft dem Kälteprozess wieder zugeführt werden.

Es finden im gesamten Prozess keine Phasenübergänge wie bei herkömmlichen Kompressionskältemaschinen statt. Das Medium, welches gekühlt werden soll, durchläuft die Prozessschritte direkt. Folglich ist keine besondere Handhabung oder Wartung des Kältemittels notwendig, wie es bei FCKW-haltigen Kältemitteln der Fall ist.

Durch die spezielle Bauweise der Maschine ist es ebenfalls möglich, den Expansions- und Kompressionsprozess innerhalb einer Maschine stattfinden zu lassen. Die durch den Entspannungsprozess gewonnene Arbeit kann über eine Welle für die Kompression aufgewendet werden, welches den äußeren Energiebedarf minimiert.

Vorteile der Rotationskompressionsmaschine

Die Vorteile der Rotationskompressionsmaschine liegen insbesondere in der Verwendung des natürlichen Kältemittels Luft. Die Luft kann indirekt, in einem sekundären Kreislauf als Kältemittel eingesetzt oder direkt als zu kühlende Luft in einem Primärkreislauf verwendet werden. Im Vergleich zu CO₂-Kälteanlagen sind weiterhin keine Warnmeldesysteme aufgrund eines hohen Betriebsdruckes notwendig. Sie zeichnet sich somit durch einen wartungsarmen und zuverlässigen Betrieb aus. Zusätzlich ist kein Schmieröl für die Bewegung der Kolben von Nöten. Weiterhin sind keine speziellen Dichtungen oder Dichtringe notwendig, da die Abdichtung der Kammern ausschließlich durch einen Ringspalt des Mediums Luft erfolgt. Dieser dichtet die jeweiligen Kammern voneinander ab.

Simulation - fluiddynamische Voruntersuchung

Modellierung

Die Modellierung der Rotationskompressionskältemaschine ist aus einem CAD-Modell in der Software ICEM CFD und ANSYS-CFX erfolgt. Das Rechenggebiet konnte mit ICEM CFD vernetzt werden. Aufgrund der doch simplen Geometrie konnte hierbei auf die strukturierte Vernetzung zurückgegriffen werden. Schwierigkeiten weist die Bewegung der Rotoren auf, die zur Verkleinerung und Vergrößerung der Kammern während der Zeitschritte führen. Um dieses Phänomen dennoch abbilden zu können, wurde das Moving-Mesh in ANSYS-CFX verwendet, welches die Bewegung der Netzgitter zulässt. Da es sich bei dem Kompressionsvorgang der Maschine um ein instationäres Problem handelt, ist eine transiente Rechnung mit feinen Zeitschritten von Nöten. Die Randbedingungen der durchgeführten CFD-Berechnung sind in Tabelle 2 dargestellt. Diese wurden aus dem Leitfaden zur Auslegung von raumluftechnischen Anlagen von Siegwart abgeleitet (E. Siegwart 2000).

Tabelle 2 Randbedingungen der Berechnung für eine Kompression von Prozessschritt 1 nach 2

Randbedingung	Wert
Anzahl der Umdrehungen	$n = 3000 \text{ U/min}$
Anzahl Zeitschritte	800
Einlass	$T_1 = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ $\dot{V} = 30 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$
Auslass	$p_2 = 2 \text{ bar}$
Anzahl der Knoten	1.046.350

Anzahl der Elemente	1.138.307
---------------------	-----------

Ergebnisse

In erster Näherung ist die Dichte der einzelnen Kammern innerhalb einer Umdrehung untersucht worden. Diese sind in Abbildung 6 dargestellt. Im Verlauf der jeweiligen Dichte sind die Ansätze der Winkelfunktion aus dem Getriebe zu erkennen. Die Luft innerhalb der Kammer wird dabei von einer niedrigen Dichte auf eine höhere, den jeweiligen Maxima, komprimiert. Das Dichteniveau sinkt anschließend durch das Ausstoßen der Luft am Auslass. Aus den jeweiligen Maxima und Minima kann das Kompressionsverhältnis des Prozesses ermittelt werden, es ergibt sich ein Kompressionsverhältnis von $e_c = 1.56$. Verglichen mit dem Gutachten von Dittmann, welcher ein Kompressionsverhältnis von $e_c = 1.6$ ermittelt hat, ist das Berechnungsergebnis plausibel (Dittmann 1995).

Allerdings weist das Kompressionsverhältnis Optimierungspotentiale auf, da dieses in herkömmlichen Kompressionskältemaschinen mit 1:3 vorliegt. In dieser Hinsicht sind für die Rotationskompressionskältemaschinen also Optimierungen anzustreben. Abbildung 7 zeigt den Geschwindigkeitsverlauf beim Einfüll- und Ausstoßvorgangs.

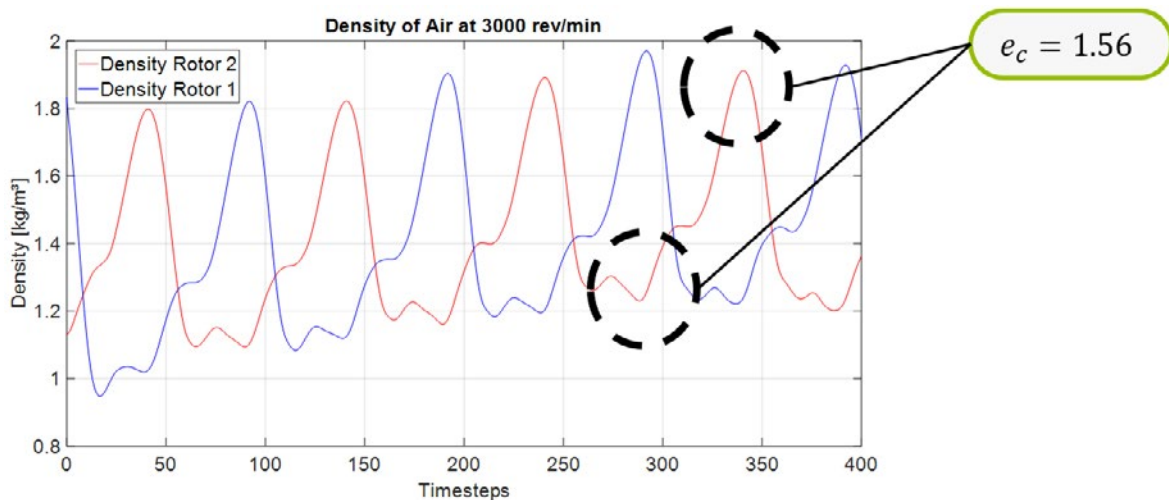


Abbildung 6 Dichteverlauf als Ergebnis der Berechnung (rot: Rotor 2, blau: Rotor 1)

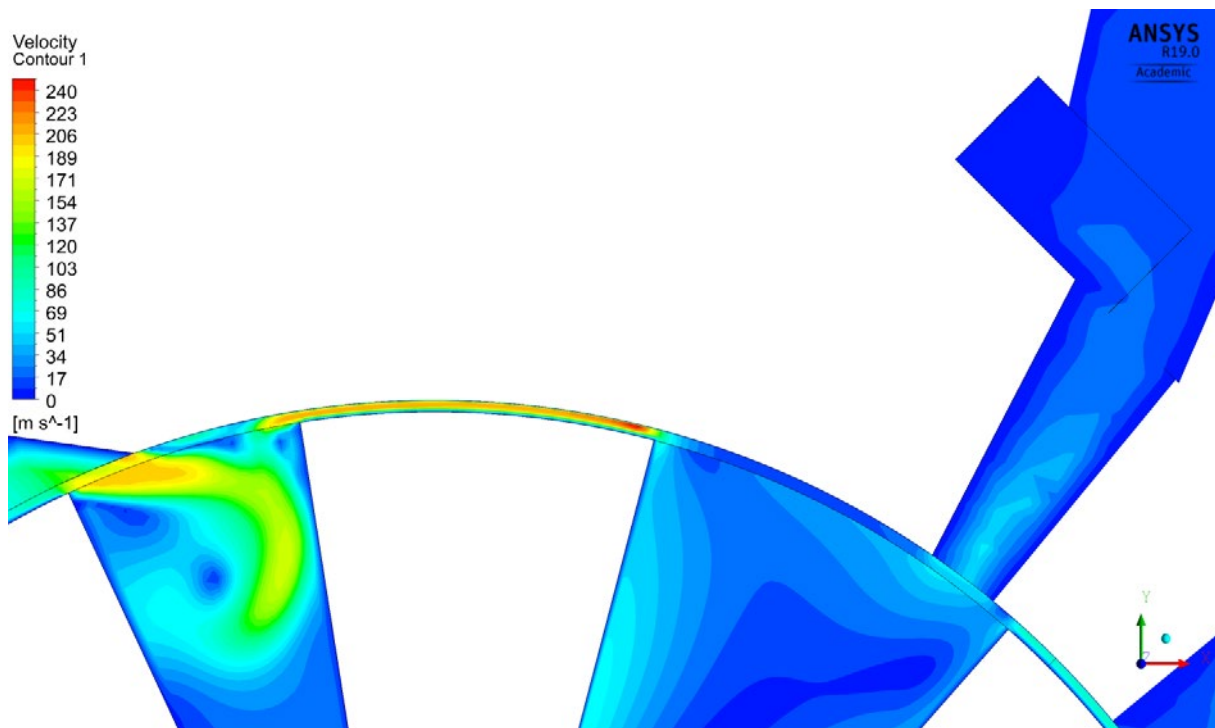


Abbildung 7 Geschwindigkeitsverlauf während des Einfüll- und Ausstoßvorgangs

Da es sich um die ersten Berechnungen handelt, sind konkrete Optimierungsvorkehrungen noch schwer zu treffen. Im nächsten Schritt gilt es, die Ergebnisse zu validieren. Dies erfolgt durch den Umbau des vorhandenen Laborstands, die Berechnungen mit den gewählten Turbulenzmodellen und Randbedingungen können so validiert werden. Im Anschluss können dann weitere Berechnungen mit geometrischen Anpassungen, sowie Änderung der Randbedingungen, Kältemittel, etc. erfolgen. Im Abschnitt Ausblick wird die weitere Vorgehensweise zur Weiterentwicklung der Maschine erläutert.

Zusammenfassung

Die Hochschule Hannover hat im, von der Europäischen Union geförderten Projekt Micro-Trigeneration, die Schukey-Maschine untersucht. Dabei sind zwei Prototypen gebaut und im Laborprüfstand getestet worden. In diesen Versuchen ist die Schukey-Maschine als Turbine zur Expansion von Dampf betrieben und deren Leistung über eine Wirbelstrombremse abgeführt worden. Beide Prototypen haben in diesen Anlagen ihre Funktionstüchtigkeit für die Expansion von Dampf zur Gewinnung von elektrischer Energie nachgewiesen.

Die Rotationskompressionsmaschine bietet die Möglichkeit, Luft als Kältemittel direkt zu kühlen. Durch die Verwendung des natürlichen Kältemittels Luft mit einem GWP von null bieten sich mehrere Vorteile wie z.B. die einfache und wartungsarme Handhabung des Mediums selbst, sowie die unlimitierte Verfügbarkeit. Luft wird in diesem Kreisprozess

zunächst komprimiert, in einem Wärmetauscher abgekühlt und im Anschluss wieder expandiert. Im Vergleich zu herkömmlichen Kompressionskältemaschinen ergeben sich allerdings noch Optimierungspotentiale hinsichtlich des Kompressionsverhältnisses. Dies haben erste CFD-Berechnungen gezeigt, die in Zukunft durch einen Laborstand mit den gewählten Modellparametern validiert werden soll.

Ausblick

Als weiteren Ausblick wird in den weiteren Untersuchungen die Optimierung des Kompressionsverhältnisses angestrebt, da dieses bisher nur ein Verhältnis von 1:1,56 liefert (im Gegensatz zu herkömmlichen Kältemaschinen mit einem Verhältnis 1:3). Zudem wird die mögliche Kondensation während des Expansionsvorgangs näher untersucht, da bei den ersten Berechnungen trockene Luft als Medium angenommen worden ist. Hierfür ist die Betrachtung der homogenen Keimbildung zu betrachten, welche die Tröpfchen Bildung des Kondensates beschreibt. Für die weiteren Berechnungen müssen außerdem Randbedingungen ermittelt werden, mit welcher die Maschine einwandfrei betrieben werden kann.

Literaturverzeichnis

- AMEV- Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltungen (2017): Kälte 2017. Hinweise zur Planung, Ausführung und Betrieb von Kälteanlagen und Kühlgeräten für öffentliche Gebäude. Hg. v. AMEV- Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltungen. Berlin (Ldf. Nr.:139), zuletzt geprüft am 28.05.2018.
- Dittmann, Achim (1995): Gutachten zum Projekt "DELTA-OMEGA-Aggregat", zuletzt geprüft am 07.06.2018.
- Dittmann, Achim; Heinze, R. (1993): Thermodynamische Begutachtung der Delta-Omega-Maschine. Hg. v. Forschungsgesellschaft für umweltschonende Energieumwandlung und -nutzung mbH, zuletzt geprüft am 07.06.2018.
- E. Siegwart (2000): Leitfaden zur Auslegung von lufttechnischen Anlagen. In: *Aerotechnik E. Siegwart GmbH*, zuletzt geprüft am 16.09.2018.
- Europäische Kommission (2018): EU legislation to control F-gases - Climate Action - European Commission. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/clima/policies/f-gas/legislation_en, zuletzt aktualisiert am 28.05.2018, zuletzt geprüft am 28.05.2018.
- Parlanti, G. (2016): Kältemittel - Report 19. Online verfügbar unter https://www.bitzer.de/shared_media/documentation/a-500-19.pdf, zuletzt geprüft am 06.03.2018.
- PLANET (1993): Mögliche Verminderung der Umweltbelastungen durch Delta-Omega-Maschinen + Grenzschicht-Wärmetauscher. Hg. v. PLANET - Planungen für die Anwendung Naturhaltender und Energiesparender Technologien, zuletzt geprüft am 07.06.2018.
- Schmidt, K.-P. (2000): Vakuum in der Kältetechnik. Vakuum in Forschung und Praxis.

Effektivitätsnachweis bei Mengenbehandlungsprozessen zum Bestandserhalt schriftlicher Kulturgüter

Schmuck, Maren; Hondozi, Saranda, Nadolny, Anne; Lüdersen, Ulrich

Keywords: Bestandserhaltung, Massenentsäuerung, Massenreinigung, Validierung, ISO/TS 18344:2016, DIN 32701:2018-11

Einleitung

Große Teile der Bestände in Archiven, Museen und Bibliotheken sind durch säurehaltiges Papier, Kriegs- und Wasserschäden, sowie schlechte Lagerbedingungen in ihrer Substanz bedroht. Allein in öffentlichen Archiven beträgt die Säuregefährdung etwa die Hälfte der vorhandenen Bestände [Hartwieg et. al. 2015, S. 27]. Eine von der Koordinierungsstelle für die Erhaltung des schriftlichen Kulturguts (kurz: KEK) vorgelegte Handlungsempfehlung zeigt auf, dass 1,8 Mio. Regalmeter in öffentlichen Einrichtungen, 5,2 Mio. geschädigte Bände in Bibliotheken des Bundes, sowie 3,7 Mio. geschädigte Bände auf Länderebene vom Papierzerfall, sowohl durch säurehaltige Papiere, als auch durch Schimmelpilzbefall bedroht sind. Um jährlich mindestens 1 % der gefährdeten Bestände bearbeiten zu können, werden derzeit 63 Mio. EUR benötigt [ebd., S. 9; 25-27].

Für die Substanzgefährdung von schriftlichen Archivalien ist primär der Prozess der industriellen Herstellung von Papier auf Cellulosebasis zwischen 1820 und 1980 durch Verwendung von sauren Leimungen, Hemicellulosen und Lignin verantwortlich [Schuhmann et al. 2017 S. 48]. Da das Papier bereits herstellungsbedingt einen sauren pH-Wert aufweist, spricht man von endogenen Säurequellen. Aber auch säurehaltige Tinten wie die Eisengallustinte oder Schadgase als exogene Säurequellen können in Verbindung mit Wasser aus der Umgebungsluft Säuren bilden und zu einem Abbau der Cellulosefasern führen [Allianz 2009, S. 11f].

Neben dem Papierzerfall durch Säurefraß kommt es bundes- und weltweit immer wieder zur Kontaminierung von vielen Regalkilometern Büchern und Archivalien mit Schimmelpilzen und Schmutzab-, bzw. –einlagerungen durch nicht sachgerechte Lagerung, unvorhersehbare Katastrophen (in Deutschland z.B. Kölner- Stadtarchiv, Oder-Hochwasser, sonstige Flut- und Wasserschäden), Klimaänderungen (z.B. Ausfall der Klimaanlage), unsichtbare und sichtbare Schäden (z.B. Wasserrohrbruch, Baumängel).

Mit Schimmelpilzen kontaminierte Archivalien werden durch die Stoffwechselprodukte der Pilze teils massiv geschädigt. Verantwortlich für den Abbau der Papiersubstanz sind Cellulose-spaltende Enzyme und organische Säuren, die das Papier zersetzen. Zudem stellen Schimmelpilze ein erhebliches gesundheitliches Risiko für die mit ihnen in Kontakt kommenden Personen z.B. Archivare und Bibliothekare dar. [Arndt et al, S. 2f].

Die Anzahl der durch Säuren, Schmutz und Schimmel betroffenen schriftlichen Kulturgüter ist so hoch, dass eine reine manuelle Bearbeitung der Bestände keine wirtschaftliche Option darstellt. Verschiedene Mengenbehandlungsprozesse als Mittel der Bestandserhaltung werden daher seit Mitte der 1990er Jahre meist durch spezialisierte Dienstleister durchgeführt [Anders 2009, S.11]. Um den Archiven, Museen und Bibliotheken eine Bewertungsgrundlage für die jeweiligen Verfahren zu bieten, erfordert es Evaluierungskriterien, die eine qualitative und quantitative Bewertung von Mengenbehandlungsprozessen ermöglichen.

Mengenbehandlungsprozesse

Um die selbstzersetzende Wirkung betroffener Kulturgüter möglichst schnell und in hoher Stückzahl zu reduzieren, bieten Dienstleister Mengenbehandlungen zum Reinigen und Entsäuern großer Bestände an, die in der Lage sein müssen, die inhomogenen und vielfältigen Bestände nachhaltig und schadigungsfrei zu behandeln. Unabdingbar für jede Mengenbehandlung ist dabei eine vorab durchgeführte Bestandscharakterisierung und Festlegung der Behandlungskriterien. Besonders empfindliches, stark beschädigtes oder für den Prozess ungeeignetes Archivgut wird separiert und manuell behandelt.

Massenentsäuerung

Bei der Massenentsäuerung werden die herstellungs- und alterungsbedingt in den Papieren entstandenen und gebundenen Säuren durch Zugabe von Entsäuerungschemikalien neutralisiert. Zudem wird eine alkalische Reserve in die Papiere eingebracht, die vor erneuter Säurebildung schützen soll.

Am Markt präsent sind flüssige Tränkverfahren, bei denen in einer Flüssigkeit (wässrige oder nichtwässrige kontinuierliche Phase) Erdalkalimetalle möglichst homogen dispergiert sind, oder in gelöster Form vorliegen. Die derzeit am Markt verfügbaren Verfahren lassen sich verfahrenstechnisch in zwei Prozesstypen einteilen: die Dispersionsverfahren und die Lösemitteltränkverfahren. Gemeinsam haben die Prozesse, dass es sich um Tränkverfahren handelt. Je nach angewendetem Prozess unterscheiden sich die Grundchemikalien, die

Neutralisationseigenschaften zur Nutzung der alkalischen Reserve und damit teilweise die Reaktionskinetik für den gesamten Prozess.

Massenreinigung

Je nach Art der Schädigung, gibt es eine Vielzahl an konservatorischen Reinigungsmaßnahmen, die am Archivgut durchgeführt werden. In mehr als 95 % der Fälle werden die Dokumente in den Archiven, Museen und Bibliotheken durch mechanische Oberflächenreinigungen behandelt, bei der das Archivgut durch Abbürsten und Abwischen von oberflächlichen Schmutzpartikeln, leicht anhaftendem Schimmel und Staub befreit wird. Bei einer starken Beschädigung, beispielsweise durch Wasserschäden, kann durch eine dem Reinigungsverfahren vorgelagerte Gefriertrocknung die Auskeimung von Schimmel unterbunden bzw. verringert werden. Die vorhandenen Pilzsporen bleiben jedoch keimfähig. Zur Abtötung dieser keimfähigen Sporen gibt es zwei bisher eingesetzte mengentaugliche Sterilisierungsverfahren: Die Begasung mit Ethylenoxid und die Gamma-Bestrahlung (Cobalt-60) [Arndt et al 2010, S. 8-10].

Derzeit gibt es am Markt nur wenige Mengenreinigungsverfahren, die für die Reinigung und Dekontamination von Archivgut eingesetzt werden. Die HAWK hat zusammen mit der Firma Becker Systems GmbH ein Mengenreinigungsverfahren entwickelt, das basierend auf elektrostatischen Effekten eine Oberflächenreinigung und Entstaubung großformatiger Objekte ermöglichen soll [Becker et al 2011, S.166f].

Ein weiteres Mengenbehandlungsverfahren zur Reinigung und Dekontamination von gebundenen Archiv- und Bibliotheksmaterialien entwickelte die Hochschule Hannover in Zusammenarbeit mit der GSK mbH mit dem Ziel, Schmutzpartikel von der Papieroberfläche abzutragen, Mikroorganismen auf und in der Papierstruktur abzutöten und auszutragen, sowie Querkontaminationen durch den Behandlungsprozess zu vermeiden. Dabei werden die betroffenen Objekte auf einem eigens dafür entwickelten Warenträger befestigt, welcher sich in einem geschlossenen, mit der Wirkflüssigkeit geflutetem Reaktor um die eigene Längsachse dreht und während der Tränkung ein Auffächern einzelner Seiten und deren An-, Um- und Durchspülung bewirkt [Lüdersen 2017].

Standards in der Mengenbehandlung schriftlicher Kulturgüter

Um über einen Prozessablauf hinweg möglichst gleichbleibende Behandlungsergebnisse in Bezug auf die Entsäuerungs- und Reinigungsleistung gewährleisten zu können, reicht es nicht aus, lediglich die verfahrenstechnischen und chemischen Prozessparameter zu überwachen.

Da die zu behandelnden Bestände hinsichtlich ihres Schädigungsgrades, ihrer Rohstoffzusammensetzung und Beschaffenheit stark variieren, müssen für die Überprüfung der Wirksamkeit der jeweiligen Verfahren neben den verfahrenstechnischen Prozessparametern zudem prozessbegleitende Standards zur Effektivitätskontrolle und Verifizierung der Abläufe festgelegt werden.

Im Rahmen des „KUR“-Projekts zur Untersuchung der Nachhaltigkeit von Entsäuerungsmaßnahmen an Bibliotheksgut wurde unter Verwendung naturwissenschaftlicher Ansätze und Methoden der langfristige Behandlungserfolg dieser Entsäuerungsverfahren untersucht und die Ergebnisse als Entscheidungshilfe für Restauratoren und Archivare zugänglich gemacht [Jaeger, 2009].

Seitdem hat sich die Marktsituation durch die Etablierung neuer Verfahren und Untersuchungsmethoden geändert, sodass, ausgehend von einer deutschen Initiative, eine Normung auf internationaler Ebene angestoßen wurde, um die Mindestanforderungen an die Wirksamkeit von Entsäuerungsprozessen standardisiert festzuhalten.

Daraus resultierend erschien 2016 die ISO/TS 18344:2016 „Effectiveness of paper deacidification processes“, die in vollständig überarbeiteter Version im April 2017 als Normentwurf und dann als DIN 32701:2018-11 in das deutsche Regelwerk übernommen wurde [Allscher et. al. 2018, S. 16f]. Für die Evaluierung von Mengenreinigungsprozessen gibt es aktuell keine vergleichbaren Standards, die eine Beurteilung des Reinigungserfolges, insbesondere der Tiefenwirksamkeit ermöglichen. Die einzigen bislang eingesetzten Methoden, entstammen mit der Verwendung von ATP/ (AMP)-Messungen mit Hilfe von Biolumineszenz und Kultivierung von Abklatschproben zur Bestimmung der koloniebildenden Einheiten aus dem Bereich der Krankenhaushygiene.

Methoden zur Messung des Behandlungserfolges von Papierentsäuerungsbehandlungen

Der chemische Zustand eines Papiers wurde bisher vorwiegend durch seinen pH-Wert ermittelt. Ein Papier gilt als „sauer“ ab einem pH-Wert von unter 6,0. Als Standardmessung hat sich eine Bestimmung im Wasserextrakt nach ISO 6588-1 etabliert. Neben der Neutralisation der im Papier enthaltenen Säuren ist es erforderlich, eine alkalische Reserve in das Papier einzubringen, um es vor erneuter Säurebildung und Säureeinwirkung zu schützen. Die alkalische Reserve wird durch eine Säure-Base-Titration nach ISO 10716 bestimmt und ist die Differenz zwischen der aufgenommenen Menge an Entsäuerungsmittel und der

Säuremenge im Papier. Sie wird ausgedrückt in Massenprozent Magnesiumcarbonat (MgCO_3).

Neben diesen beiden zentralen Kriterien für den Behandlungserfolg gibt es weitere Methoden, die zur Bewertung des Papierzustandes herangezogen werden.

Als neues Verfahren wird die Bestimmung des Polymerisationsgrades nach ISO 5351 eingeführt. Der Polymerisationsgrad ist ein Maß für die Anzahl zusammenhängender Glucose-Einheiten der Cellulose und somit ein indirektes Verfahren für die Bestimmung der Kettenlänge der Cellulosemoleküle. Ein hoher Polymerisationsgrad korreliert mit der Festigkeit der Fasern im Papier.

Eine weitere Möglichkeit das Belastungsverhalten von Papieren zu ermitteln ist eine Bestimmung der Zugbeanspruchung nach DIN EN ISO 1924-2 oder die Bestimmung der Bruchkraft nach Bansa-Hofer-Falzung [Bansa et. al. 1980, S. 348-355].

Methodenüberprüfung der Depolymerisationsgradmessung

Im Rahmen der Normentwicklung wurde in einem Ringversuch mit drei unabhängigen Laboren untersucht, ob die vorgeschlagene Methode zur Bestimmung des Polymerisationsgrades hinsichtlich einer qualitativen und quantitativen Beurteilung von Massenentsäuerungsverfahren geeignet ist. Dabei erfolgte die Ermittlung der Grenzviskosität von unbehandeltem, entsäuertem und gealtertem, Testpapier unter Verwendung des Normtextes. Die Behandlung erfolgte in einem Testreaktor der Hochschule Hannover mittels einer alkalischen Wirkstofflösung. Die Messung des Polymerisationsgrades wurde von drei Prüfinstituten als Mehrfachmessung unabhängig voneinander unter Anwendung der Norm durchgeführt. Als Ergebnisse wird festgestellt, dass die Abweichung der Messwerte als Mittelwerte zwischen den Instituten stark differieren (8% bei unbehandelten, 26% bei behandelten, 22% bei behandelten und gealterten Proben). Wesentlich sind die Differenzen bei dem Wirkungsnachweis der Behandlung. Beim Vergleich der Ergebnisse der verschiedenen Prüfinstitute liegt die Abweichung der Ergebnisse bei mehr als 14 %. Die Einzelmessungen der jeweiligen Prüfinstitute zeigen eine geringe Standardabweichung (durchschnittlich 1,5 %).

Die Viskositätsmessung hängt stark von der Probenvorbereitung ab. Bereits Abweichungen bei der Handhabung oder störende Partikel können einen wesentlichen Einfluss haben. Dieses wurde auch von den jeweiligen Prüfinstituten bestätigt.

Wie die Untersuchung der Ergebnisse zeigt, ist diese Methode geeignet, stabile Prozessbedingungen zu demonstrieren, es müssen aber große Abweichungen in Kauf

genommen werden. Da diese Messung primär für reine Zellstoffe angewendet wird, ist sie zur Bestimmung der mechanischen Festigkeit des Testpapiers ungeeignet. Weiterhin ist eine Vergleichbarkeit von Behandlungsverfahren über die Messung des Polymerisationsgrades aufgrund der vielen Einflussparameter auf die Messung nicht sinnvoll.

Exkurs: Die Bestimmung des Polymerisationsgrades durch Messung der Viskosität zeigt indirekt an, wie lang die enthaltenen Polymerketten sind. Je geringer der DP (degree of polymerization), desto geringer ist die mechanische Stabilität des Papiers aufgrund der reinen Faserlänge. Säurekatalytische Reaktionen und Oxidationsmechanismen bauen die Celluloseketten an der beta-1,4-glykosidischen Bindung ab. Der Polymerisationsgrad wird durch eine Viskositätsmessung nach der ISO 5351 „Pulps – Determination of limiting viscosity number in cupriethylenediamine (CED) solution“ [ISO 5351:2010(E)] bestimmt.

Methodenüberprüfung Reinigung

Um den Reinigungserfolg - insbesondere bei der Schimmelpilzbehandlung - an Archivalien zu überprüfen, hat sich die Messung von ATP/AMP mit Hilfe des Biolumineszenz-Verfahrens etabliert. Dabei reagiert vorhandenes ATP aus einem Abstrich mit Luciferin und Luciferase enzymatisch, wobei Licht entsteht, das in Relative Light Units (RLU) ausgedrückt wird. Das Lichtsignal wird in einem Luminometer gemessen.

Zur Validierung der ATP/AMP-Tests erfolgte im Rahmen einer Bachelorarbeit die Untersuchung der Variabilität und Störanfälligkeit [Hondozi, 2018]. Dazu wurde eine Kalibrationsreihe mit reinem ATP als Referenz aufgestellt und verschiedene Einflussfaktoren in der Handhabung identifiziert.

Da die Einheit [RLU] nicht standardisiert ist, ist es möglich, dass einzelne Geräte unterschiedliche Messwerte bei gleichen ATP-Konzentrationen ausgeben. Um den Einfluss der verwendeten Geräte zur ATP-Messung festzustellen, werden Stichprobenweise drei Geräte miteinander verglichen. So wird ein Unterschied zwischen ATP/AMP-Tests wie dem LuciPac Pen der Firma kikkoman® und einfachen ATP-Tests wie dem HyLite2-System von Merck oder dem AccuPoint Advanced System der Firma Neogen festgestellt. Die Testgeräte wurden anhand weiterer Probenahmen und unter gleichen Bedingungen getestet und miteinander verglichen.

Als weiterer Einflussfaktor wurden unterschiedliche Beprobungsmuster gewählt. Neben dem 5x5 cm Beprobungsmuster aus Abbildung 2 werden häufig auch andere Muster gewählt [Wilke, 2012], da eine Standardisierung an dieser Stelle nicht gegeben ist. Um den Einfluss

der Größe der Testfläche und der Art und Weise der Anwendung zu ermitteln, wurde das vorherig definierte Standardmuster mit dem folgenden 3-Strich-Muster verglichen: es wird ein 4x4cm großes Feld markiert und drei horizontale Linien innerhalb der markierten Fläche gezogen. Mit dem Swab des LuciPac Pens werden die drei Linien beprobt, indem diese einmal auf diesen in rotierender Bewegung des Swabs hin- und zurückgewischt werden (vgl. Abbildung 3). Die Größe der Probenfläche und das Beprobungsmuster haben einen großen Einfluss auf die RLU Werte.

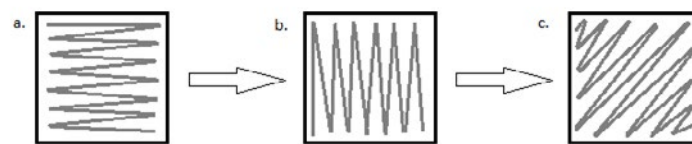


Abbildung 1: Beprobungsmuster LuciPacPen, Testfläche (5x5 cm) [Hondozi, 2018]



Abbildung 2: 3-Strich-Methode, Testfläche (4x4 cm) [Hondozi, 2018]

Zur Überprüfung auf mikrobielles Wachstum wurde das Archivgut teils in Nährmedien eingegossen, teils wurden Abklatschtests durchgeführt. Es folgte eine Bebrütung aller Nährmedien mit anschließender Untersuchung auf mikrobielles Wachstum. Durch zusätzliche Beprobung mit dem ATP/AMP-Test sollten direkte Vergleiche von RLU und mikrobiellem Wachstum gezogen werden. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass der Test stabile zu der ATP-Konzentration proportionale Werte misst. Es konnte jedoch auch festgestellt werden, dass sich zwischen der Anzucht von Mikroorganismen auf Nährmedium und der Messung von RLU kein direkter Zusammenhang herstellen lässt. Zudem haben die ATP(/AMP)-Messungen auf dem Archivgut eine hohe Streuung und somit Variabilität der Werte auf einem einzelnen Objekt (Abb.3) und abhängig vom Grad der Schädigung (Abb. 4) gezeigt.

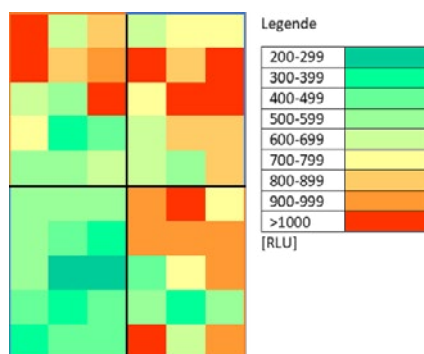


Abb.3 RLU-Werte über eine Seite bei Beprobungsmuster 5x5cm, Schädigung: durch Schimmelpilze partielle Auflösung Papiersubstanz,

**Papier an diesen Stellen wolkig, weich und ohne Festigkeit.
rot RLU-Werte >1000, dunkelgrün RLU-Werte 200-299**

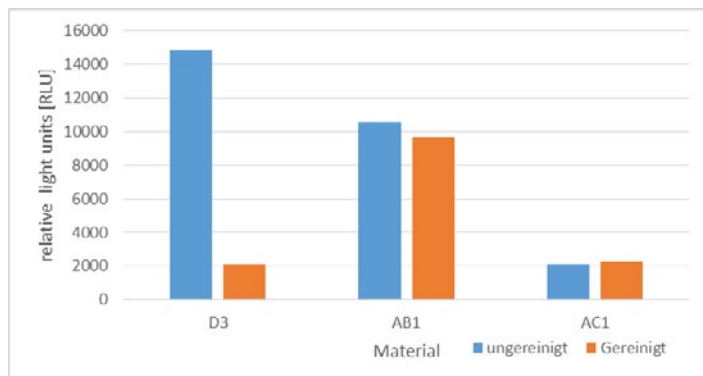


Abb. 4 Einfluss des Schädigungsgrades des Papierses auf RLU-Werte

D3: Sporen liegen sichtbar an Papieroberfläche, leicht abnehmbar, kein Verlust der mechanischen Festigkeit

AB1: gut sichtbarer weißer Strahlenpilz und möglicherweise andere Mikroorganismen, völlige Versprödung des Papiers, Falzzahl 1, brüchig wie Glas

AC1: schwerschimmelgeschädigte Pappen, partiell aufgelöst, wolkig, weich und ohne Festigkeit

Der Zustand und die Zusammensetzung des Papierses spielt demnach bei der Anwendung der Methodik eine wesentliche Rolle [Nadolny et al. 2018].

Zusammenfassung und Ausblick

Der Schutz schriftlicher Kulturgüter vor Feuchtigkeit, Schimmel und Säurefraß durch mengentaugliche Behandlungsprozesse stellt eine Herausforderung an die Prozessgestaltung, sowie an die Methoden zur Erfolgs- und Nachhaltigkeitskontrolle dar, bedingt durch heterogene Bestände mit unterschiedlichen Schädigungsgraden.

Bei der Mengenreinigung fehlt es grundsätzlich an standardisierten Methoden für den Nachweis des Reinigungserfolges. Daher werden Methoden aus der Lebensmittel- und Krankenhaushygiene in die Anwendung zum Messen einer Behandlungsnotwendigkeit und eines Behandlungserfolges transferiert. Die bisherigen Untersuchungsergebnisse zeigen, dass die Effektivität einer Trockenreinigung durch einzelne Stichproben und unterschiedliche große Probenflächen und Probennahmemuster nur eingeschränkt mittels ATP/AMP-Messung überprüft werden kann. Es mangelt an konkreten Anleitungen zur Art und Weise der Probennahme, der Art der Messgeräte und der Interpretation der Ergebnisse. Vergleichsweise verlässliche Daten zur Qualitätssicherung des Reinigungserfolges sind nur durch standardisierte Routinen der Probennahme und Schnelltest-Anwendung in Ansätzen möglich. Grundsätzlich ermöglichen die ATP/AMP Schnelltests einen ersten Anhaltspunkt über die Keimbelastung von Schriftgütern.

Die Frage nach der Effektivität von Mengenentsäuerungsverfahren kann durch die fortgeschrittene Standardisierung der in den Normen festgelegten Verfahren weitestgehend

beantwortet werden, wenngleich die Prüfmethoden keinen Vergleich zwischen einzelnen Behandlungsverfahren zulassen, da die Freiheitsgrade der Messmethoden und der Testmaterialien eine zu große Streuung aufweisen.

Die Frage nach Entscheidungsgrundlagen für eine Notwendigkeit restauratorischer Maßnahmen und die geeignete Auswahl der am Markt verfügbaren Methoden stehen jedoch weiterhin im Raum [Engel + Nadolny, 2019]. Ein Forschungskooperationsprojekt unter Beteiligung von Frau Prof. Dr. Anne Nadolny beschäftigt sich aktuell mit genau dieser Fragestellung und entwickelt gemeinsam mit Vertretern aus dem Bereich der Restaurierung und Bestandserhaltung Evaluierungskriterien zur Beurteilung von Restaurierungsmethoden und –ergebnissen in der Schriftguterhaltung.

Literaturverzeichnis

Allianz (2009): Zukunft bewahren. Eine Denkschrift der Allianz zur Erhaltung des schriftlichen Kulturguts. Hrsg. V. Barbara Schneider-Krempf. Berlin: Staatsbibliothek zu Berlin – Preußischer Kulturbesitz.

Allscher, Thorsten; Ceynowa, Irmhild (2018): Mengenentsäuerung – Verfahrensvalidierung, Evaluierung und Qualitätssicherung. Neue Einsichten und bleibende Fragen. In: *ABI Technik 2018*; 38(1): 16-28.

Anders, Manfred (2009): Reduzierung von Energieverbrauch und Emissionen des Massenentsäuerungsverfahrens des ZFB Leipzig. *DBU Abschlussbericht, AZ: 25087/-21/2*.

Arndt, Claudia; Fische-Pache, Wiltrud; Metzdorf, Jens; Schubert, Birgit; Weber, Peter (2010): Umgang mit Schimmel in Archiven. Unterausschuss Bestandserhaltung. Empfehlungen der Bundeskonferenz der Kommunalarchive beim Deutschen Städtetag.

Bansa, Helmut; Hofer, Hans H. (1980): Die Beschreibung der Benutzbarkeitsqualität gealterter Papiere in Bibliotheken und Archiven. In: *Das Papier 34*, S. 348-355.

Becker, Ernst; Reikow-Räuchle, Manuela; Banik, Gerhard (2011): A New Mass Scale Surface Cleaning Technology for Collection of Historical Maps. In: *Restaurator 32*: S. 160-191.

Engel Patricia; **Nadolny**, Anne (2019): Entscheidungsgrundlagen für Restaurierungsmaßnahmen- sind sie ausreichend?. In: *Restaurio 2/2019*: S. 20-23

Hartwig, Ursula; Lehmann, Sonja Annette; Vogel, Michael (2015): Die Erhaltung des schriftlichen Kulturguts in Archiven und Bibliotheken in Deutschland. Bundesweite Handlungsempfehlungen für die Beauftragte der Bundesregierung für Kultur und Medien (BKM) und die Kultusministerkonferenz (KMK). Berlin: KEK - Koordinierungsstelle für die Erhaltung des Schriftlichen Kulturguts an der Staatsbibliothek zu Berlin - Preussischer Kulturbesitz.

Hondozi, Saranda (2018): Validierung eines Messverfahrens zur Überprüfung der mikrobiellen Belastung von Archivgut. Bachelorarbeit Hochschule Hannover, unveröffentlicht

Jaeger, Thomas (2009): Die Massenentsäuerung auf dem Prüfstand. Das „KUR“-Projekt zur Untersuchung der Nachhaltigkeit von Entsäuerungsmaßnahmen an Bibliotheksgut. Konferenzveröffentlichung: 98. Deutscher Bibliothekartag

Nadolny, Anne; Scheerer Stefanie; Preuss Stephanie (2018): Bestandserhaltung im Dialog- Über Sinn und Unsinn der ATP/AMP-Messung. 8. Tag der Bestandserhaltung: Schimmel, Schutz und Kampf gegen mikrobiellen Befall, 27. September 2018, Kompetenzzentrum Bestandserhaltung für Archive und Bibliotheken in Berlin und Brandenburg (KBE)

Lüdersen, Ulrich (2017): Ein Mengenreinigungssystem für Archiv- und Bibliotheksgut. Funktionsprinzip, Wirkungsgrad und Effizienz. Fachtagung: Objekthygiene im Kontext von Kulturgut – Die Herausforderung der Massenverfahren, 10.Mai 2017, LVR Archivberatungs- und Fortbildungszentrum, Köln-Deutz.

Schuhmann, Katharina; Moczarski, Jana; Anders, Manfred (2017): Zum Umgang mit gealterten Papieren. Erläuterungen zu Alterungsmechanismen, Entsäuerungsverfahren und aktuellen Erkenntnissen über die dabei eingebrachte alkalische Reserve. In: *Archivar : Zeitschrift für Archivwesen* 70 (1), S. 48–52.

Wilke, Lisa (2012): Trockenreinigung zur Dekontamination von Lederoberflächen mit Schimmelpilzbefall. Verlag der Anton Siegl Fachbuchhandlung GmbH, München

Normen

ISO/TS 18344:2016-02: Effectiveness of paper deacidification processes.

ISO 5351:2010(E): Pulps – Determination of limiting viscosity number in cupriethylenediamine (CED) solution

ISO 6588-1: Paper, board and pulps – Determination of pH of aqueous extracts – Part 1: Cold extraction.

ISO 10716: Paper and board – Determination of alkali reserve.

DIN EN ISO 1924-2:2009-05: Papier und Pappe – Bestimmung von Eigenschaften bei Zugbeanspruchung – Teil 2: Verfahren mit konstanter Dehngeschwindigkeit (20 mm/min) (ISO 1924-2:2008); Deutsche Fassung EN ISO 1924-2:2008.

FoMaSK

Der seit über zehn Jahren bestehende Forschungsbereich Massenerhaltungssysteme für schriftliche Kulturgüter (kurz: FoMaSK) am Institut für Verfahrenstechnik, Energietechnik und Klimaschutz ist das Kompetenzzentrum für die Erforschung und Entwicklung von Massenerhaltungssystemen schriftlicher Kulturgüter und für die damit verbundene Qualitätssicherung. Aus der Bündelung der Laboraktivitäten der Hochschule Hannover ist ein spezialisiertes Labor mit eigenen Anlagen und eigenem Prüflabor entstanden, welches neben der Forschung auch die Aufgabe der Qualitätssicherung und –kontrolle für die Entsäuerung, Verfestigung, Reinigung und Alterung von Archivalien erfüllen kann.

Urbane Mobilität – Klassifizierung von Stadtteilen für die Identifikation von Potentialen im städtischen Lieferverkehr

Dünte, Jan; Fünfkirchler, Timo; Gusig, Lars-Oliver

Urbanisierung – Logistischer Bedarf von Metropolen der Zukunft

Nach Prognosen der Vereinten Nationen werden bis 2050 zwei Drittel der Menschheit in Städten leben. Einhergehend ist damit der Bedarf nach stetig und immer schneller zu errichtender Infrastruktur. Teilweise werden Städte schneller wachsen als die Stadt mit der Infrastruktur nachkommen könnte (Zukunftsinstitut, 2018). In Deutschland werden sich solche Szenarien voraussichtlich nicht in dieser Art erfüllen. Allerdings wird global gesehen der Druck immer größer, eine nachhaltige aber dennoch effiziente Mobilität zu ermöglichen. Aus diesem Grund resultiert die Forschungsabsicht, die Versorgung von Städten zu untersuchen und alternative Mobilitätslösungen zu entwickeln. Gerade innovative Technologien wie im Bereich von Smart City machen die Mobilität interessant, um beispielsweise anhand intelligenter Verkehrssteuerung oder neuer Konzepte die urbane Logistik in Städten effizienter zu gestalten (Stichworte z.B. Müll-Abfuhr On-Demand, Smart Citizen).

Die Debatte über drohende Dieselfahrverbote zeigt die Aktualität dieses Forschungsgebietes und beweist, dass auch in deutschen Großstädten der Bedarf besteht, Städte in Zukunft lebenswerter zu gestalten.

Hannover als Modellregion für die Urbane Logistik der Zukunft

Aus seiner Tradition als autogerechte Stadt und aufgrund seiner logistischen Bedeutung innerhalb Europas und Deutschlands hat Hannover hervorragende Voraussetzungen, um das Thema der urbanen Logistik zu besetzen und neu zu denken. Mit Partnern aus Wirtschaft und Wissenschaft wurde daher im Jahr 2016 die „Projektinitiative Urbane Logistik“ ins Leben gerufen. Mit dem Ziel, die Metropolregion Hannover bis 2030 in eine Kompetenzregion für urbane Logistik zu wandeln, werden innerhalb der Projektinitiative verschiedene Handlungsfelder bearbeitet, die sich darauf konzentrieren, die Logistik stadtverträglich, innovativ und emissionsfrei zu gestalten. Als Teil der „Projektinitiative Urbane Logistik“ startete im September 2017 das kooperative Forschungsprojekt USEfUL (Untersuchungs-, Simulations- und Evaluationstool für Urbane Logistik). Das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Projekt befasst sich mit der „Erfassung, Simulation und

Bewertung von zukunfts- und zielorientierten Lösungsansätzen für eine urbane Logistik“. Unter der Führung der Landeshauptstadt Hannover werden darin die Kompetenzen aus Wirtschaft (Volkswagen Nutzfahrzeuge) und Wissenschaft (Hochschule Hannover, Leibniz Universität Hannover und TU Braunschweig) gebündelt, um den Zielen der Projektinitiative gerecht zu werden (siehe Abbildung 1).

Aufgabe des Projekts USEfUL ist die Entwicklung und Evaluation von innerstädtischen Logistikprozessen und -konzepten mithilfe von Simulationsmodellen. Über diesen Ansatz soll die Möglichkeit geschaffen werden, Einflussfaktoren und Möglichkeiten zur Steuerung und Optimierung vorab zu definieren und zu variieren. Weiterhin soll die auf Simulationen basierende Herangehensweise die Kosten für die pilothafte Anwendungen einzelner Konzepte minimieren. Am Ende des Projekts entsteht so ein Entscheidungstool auf Basis einer Web-Applikation, das die Landeshauptstadt Hannover bei der praktischen Erprobung von innovativen Logistikkonzepten unterstützt. Die Übertragbarkeit auf andere Kommunen und Städte wird dabei berücksichtigt.

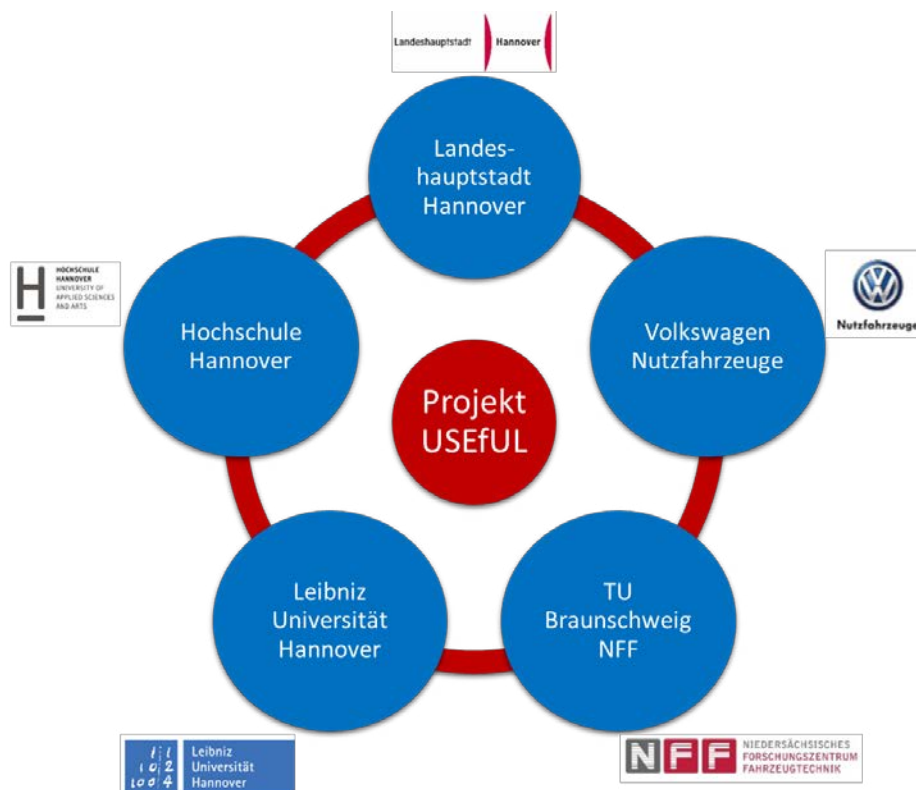


Abbildung 1: Kooperationspartner des Forschungsprojekts „USEfUL“

Aufgabe der Hochschule Hannover innerhalb des USEfUL-Projekts ist die Konzeptionierung und Simulation von geeigneten Logistikkonzepten, die zur Erreichung der oben genannten Ziele helfen könnten. Um im Vorfeld im komplexen Logistik-System einer Großstadt Logistikkonzepte zu erproben, muss das System genauer untersucht werden. Darunter fallen die

logistikrelevanten Wege der Unternehmen und Einwohner, die typische Bewegungsmuster aufweisen. Um die Komplexität zu verringern, werden Modelle herangezogen. Im Forschungsprojekt USEfUL wurden hierfür durch die Hochschule Hannover Untersuchungsräume zur pilothaften Umsetzung von Logistikkonzepten ermittelt, die modellhaft für Hannover, aber auch andere europäische Städte gelten könnten.

Untersuchungsräume der Stadt Hannover

Da europäische Städte historisch gewachsen sind und sich sowohl von Stadt zu Stadt als auch intraurban von Stadtteil zu Stadtteil unterscheiden, werden an die Auswahl der Untersuchungsräume mehrere Anforderungen gestellt. Das Ziel ist es, Hannover modellhaft mit den Untersuchungsräumen abzubilden. Über eine Sammlung von Anforderungen an die Auswahl der Untersuchungsräume konnte eine Bewertungsmethodik abgeleitet werden, die es ermöglichte geeignete Untersuchungsräume zu identifizieren und zu bestätigen. Auf die Auswahl der Untersuchungsräume wird im Folgendem genauer eingegangen. Dabei lag die Problematik darin, einerseits durchschnittliche Untersuchungsräume auszuwählen, die auf Hannover bzw. andere Städte übertragbar sind, aber andererseits auch die Problemcharakteristik (z.B. Emissionen) der Stadt in der Auswahl widerzuspiegeln.

Anforderungen an die Untersuchungsräume

In der folgenden Abbildung 2 sind die insgesamt 53 Stadtteile der Landeshauptstadt Hannover grün umrandet dargestellt. Bereits zu Beginn ist festgelegt worden, dass stadtteilgroße Untersuchungsräume ausgewählt werden. Die Auswahl einzelner Straßenzüge, die unter Umständen in keiner logistischen Verbindung zueinander stehen, kann nicht repräsentativ für eine Stadt sein, um ihre urbane Logistik zu modellieren. Zu Grunde liegt bei der Auswahl von Stadtteilen die Absicht, nicht nur eine übertragbare Flächengröße für andere Städte zu wählen, sondern auch in Bezug auf die vorhandene Datenbasis, die sich bei vielen Kommunen auf Stadtteile bezieht, anderen Städten eine eigene Auswahl von Untersuchungsräumen zu ermöglichen.

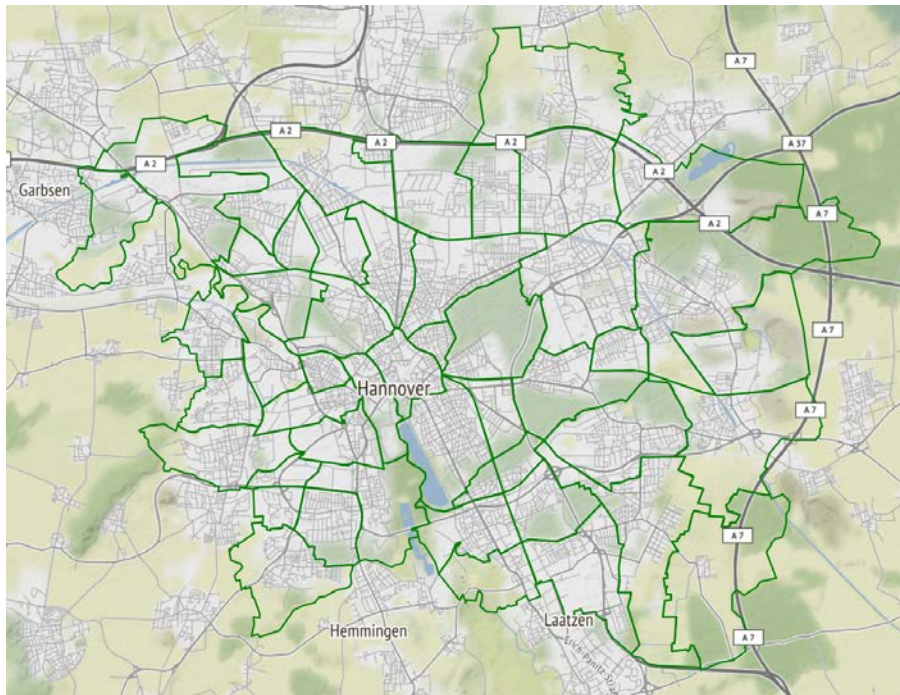


Abbildung 2: Stadtteilgrenzen Hannovers

Für die Anforderungen kann damit festgehalten werden, dass Untersuchungsräume ausgewählt werden müssen, deren Größe und deren genaue Struktur auch anderen Städten bekannt ist. Daraus folgt für die Auswahl, dass möglichst Daten herangezogen werden, die auch von anderen Städten regelmäßig erhoben werden. Der Datenverfügbarkeit wird hohe Bedeutung beigemessen, da eine Bewertung erst über Daten transparent und nachvollziehbar wird.

Unter der Anforderung der Übertragbarkeit verbirgt sich auch, dass nicht nur einseitige Stadtteile ausgewählt werden dürfen. Stadtteilgroße Gewerbe- und Industriegebiete sind zwar auch in anderen Städten nicht unüblich, stellen aber bei der Auswahl von nur drei oder vier Untersuchungsräumen nicht den Querschnitt einer Stadt dar. Für die Auswahl bedeutet dies, dass die Untersuchungsräume die Stadt funktional beispielsweise in Wohnen, Arbeiten und Einkaufen widerspiegeln sollten. In diesem Zusammenhang ist eine Diversität der Bevölkerungs- und Bebauungsstruktur unerlässlich. Gerade in Bezug auf die Bebauungsstruktur wurde der Konflikt zu der Anforderung verkehrliche Problembereiche auszuwählen deutlich. Das Kerngebiet von Großstädten ist prinzipiell als geographisches Zentrum und Ansiedlung von Großkonzernen und Unternehmen verkehrstechnisch vorbelastet. Gerade im Zentrum von Städten lassen sich Problembereiche identifizieren. Aus diesem Grund ist das Zentrum einer der interessantesten Bereiche für Verbesserungsmaßnahmen. Das Ziel des Projekts USEfUL ist es, nutzstiftende Logistikkonzepte zu entwickeln, die sich der Verkehrsproblematik annehmen. Andererseits könnte die Auswahl von Stadtteilen im Kerngebiet von Hannover nur übertragbare Erkenntnisse für das Kerngebiet von anderen Städten hervorbringen und nicht für den umgebenden urbanen Raum. Aus diesem Grund muss die Auswahl eine gute Verteilung an Problembereichen

ermöglichen, denn die zu entwickelnden Logistikkonzepte sollen nicht nur im Kerngebiet einer Stadt Verbesserungen bewerkstelligen, sondern auch im Übergangsbereich oder vorortähnlichen Stadtteilen, die verkehrstechnisch defizitär aufgestellt sind.

Kriterien

Wie im Kapitel vorher beschrieben, wurden anhand der Anforderungen Kriterien zur Bewertung abgeleitet. Tabelle 1 zeigt die abgeleiteten Kriterien in einer Übersicht und verdeutlicht über die Legende an welchem Idealwert sich die Kriterien orientieren. Die Gewichtungsfaktoren der einzelnen Kriterien können der Abbildung 3 entnommen werden.

Tabelle 1: Übersicht der Kriterien und den mit ihnen verfolgten Zielen

Orientiert am:		
Kriterium	Ø Durchschnitt als Idealwert	Ziel
	+ Maximum als Idealwert	
	- Minimum als Idealwert	
Kriterium Städtebau und Fläche		
Einwohner/ bebaute Fläche	+	Repräsentativer Stadtteil,
Einwohner absolut	+	viele Einwohner, Diversität
Gewerbefläche/ Wohnfläche	Ø	der Bebauungsstruktur, urbane Regionen
Kriterium Bevölkerungsstruktur		
Haushaltsgröße	Ø	Möglichst gut übertragbar,
Altersstruktur	Ø	durchschnittliche Struktur
Anteil Sozialversicherungspflichtig Beschäftigter	Ø	
Transferleistungsquote	Ø	
Kriterium Verkehr		
Hauptstraßen-km/ Gesamtfläche	+	Auswahl
Privat KFZ/ 1000 Einwohner	+	von Problembereichen
Gewerbliche KFZ/ 1000 Einwohner	+	
Kriterium Umwelt		
Von übermäßigem Lärm betroffene Einwohner	+	Auswahl
Mittlerer Level of Service	+	von Problembereichen
Kriterium Versorgung		
Nahversorgungsfläche/ bebaute Fläche	+	Auswahl von Stadtteilen mit erhöhter Bedeutung in der Urbanen Logistik

Bewertungsmethodik zur Auswahl von Untersuchungsräumen

Aus den Anforderungen ist bekannt, dass die Methodik zur Auswahl von Untersuchungsräumen auch anderen Städten möglich sein sollte. Aus diesem Grund ist es schlüssig eine Bewertung richtliniengemäß vorzunehmen. Dementsprechend wurde auf die VDI-Richtlinie 2225 zurückgegriffen, die auch maßgebend für die Bewertung von Konstruktionslösungen im ingenieurwissenschaftlichen Bereich herangezogen wird und eine transparente und nachvollziehbare Bewertung zulässt.

Prinzipiell werden beginnend für die Bewertung nach VDI 2225 die bereits aufgelisteten Kriterien detailliert beschrieben und gewichtet. Anschließend wird anhand von Erfüllungsgraden jedem Kriterium eine Punkteskala zugeordnet. Die Punkteskala reicht hierbei von 0 bis 4 Punkten.

Im Rahmen der Bewertung wird jeder Stadtteil einzeln den Kriterien unterzogen. Dargestellt ist dies auch in einem beispielhaften Ausschnitt in Abbildung 3, der die Oberfläche der Bewertungsmethodik visualisiert. Die im Hintergrund zugrundeliegenden Stadtteil-Daten werden mit den Grenzen der Erfüllungsgrade des jeweiligen Kriteriums verglichen. Liegen die Daten im Wertebereich eines Erfüllungsgrades, wird dem Stadtteil der zum Erfüllungsgrad zugehörige Punkt zugeordnet. Liegen die Daten beispielsweise im Wertebereich des Erfüllungsgrades, der 4 Punkte bedeuten würde, wäre das Kriterium optimal erfüllt. Umgekehrt, liegen die Daten im Wertebereich des Erfüllungsgrades, der 0 Punkte bedeuten würde, wäre das Kriterium zu keinem Teil erfüllt. Auf diese Weise kann jedem Stadtteil ein Punkt zwischen 0 und 4 pro Kriterium zugeordnet werden. Der entsprechende Punkt wird mit der vorgesehenen Gewichtung des Kriteriums multipliziert, um danach für jeden Stadtteil eine gewichtete Summe aller vergebenen Punkte der einzelnen Kriterien zu ermitteln. Wird die gewichtete Summe anschließend durch die maximal zu erreichende Punktzahl von 4 dividiert, erhält man die Wertigkeit.

Rang	Nr.	Stadtteile	Kriterium Städtebau			Kriterium Bevölkerung				Kriterium Verkehr			Kriterium Umwelt		Kriterium Nahversorgung	Summe	Wertigkeit
			Gewichtungs-faktoren			0,2				0,2			0,2		0,2	1	
			0,06	0,06	0,08	0,05	0,05	0,05	0,05	0,1	0,05	0,05	0,1	0,1	0,2	1	
			Einwohner / bebaute Fläche G	hohe Einwohnerzahl G	durchschnittliches Verhältnis Gewerbefläche zu Wohnfläche G	Nahe durchschnittliche Haushaltsgröße zum Städtedurchschnitt G	Geringe Alters-abweichung zum Städtedurchschnitt G	Geringe Abweichung des Anteils der Sozialversicherungspflichtigbeschäftigten vom Städtedurchschnitt G	Abweichung der Transferleistungsempfänger zum Städtedurchschnitt G	erhöhter Anteil Hauptstraßenfläche / Gesamtfläche G	erhöhter Anteil Privat PKW / 1000 Einwohner G	erhöhter Anteil Gewerbe KFZ / 1000 Einwohner G	erhöhter Anteil von grenzwertüberschreitenden Lärm betroffene Einwohner (Tag) / 1000 Einwohner G	hoher mittlerer Level of Service G	hoher Anteil Nahversorgungsfläche / Gesamtfläche G	Summe (ungewichtet) Summe (gewichtet)	
1	1	Mitte	2 0,1	1 0,1	2 0,2	1 0,1	1 0,1	3 0,2	3 0,2	4 0,4	1 0,1	4 0,2	3 0,3	3 0,3	4 0,8	32 2,79	0,6975
2	11	Vahrenwald	3 0,2	3 0,2	4 0,3	2 0,1	3 0,2	3 0,2	3 0,2	2 0,2	1 0,1	1 0,1	3 0,3	3 0,3	3 0,6	34 2,73	0,6825
3	10	List	3 0,2	4 0,2	3 0,2	3 0,2	3 0,2	2 0,1	2 0,1	2 0,2	2 0,1	1 0,1	4 0,4	2 0,2	3 0,6	34 2,71	0,6775
4	34	Linden-Mitte	2 0,1	1 0,1	0 0	3 0,2	3 0,2	3 0,2	4 0,2	4 0,4	1 0,1	2 0,1	4 0,4	3 0,3	3 0,6	33 2,68	0,67
5	9	Oststadt	4 0,2	2 0,1	2 0,2	2 0,1	2 0,1	3 0,2	2 0,1	3 0,3	1 0,1	1 0,1	1 0,1	4 0,4	3 0,6	30 2,47	0,6175
6	4	Südstadt	3 0,2	4 0,2	2 0,2	2 0,1	2 0,1	1 0,1	2 0,1	2 0,2	1 0,1	1 0,1	3 0,3	3 0,3	3 0,6	29 2,43	0,6075
7	25	Groß-Buchholz	1 0,1	3 0,2	3 0,2	4 0,2	3 0,2	3 0,2	3 0,2	2 0,2	2 0,1	1 0,1	2 0,2	3 0,3	2 0,4	32 2,38	0,595
8	33	Linden-Nord	4 0,2	2 0,1	2 0,2	1 0,1	2 0,1	3 0,2	3 0,2	2 0,2	0 0	0 0	3 0,3	3 0,3	3 0,6	28 2,37	0,5925
9	41	Oberricklingen	2 0,1	1 0,1	2 0,2	3 0,2	3 0,2	3 0,2	3 0,2	3 0,3	2 0,1	1 0,1	2 0,2	3 0,3	2 0,4	30 2,29	0,5725
10	3	Nordstadt	3 0,2	2 0,1	3 0,2	2 0,1	2 0,1	2 0,1	3 0,2	3 0,3	0 0	1 0,1	3 0,3	2 0,2	2 0,4	28 2,24	0,56
...

Abbildung 3: Beispielhafter Ausschnitt von der Oberfläche der Bewertungsmethodik

Anhand der Wertigkeit sortiert, konnten anschließend zehn Stadtteile ausgewählt werden, die besonders geeignet zu sein schienen. Im folgenden Kapitel 3.4 sind die Ergebnisse der Bewertungsmethodik nach VDI 2225 vorgestellt.

Da durch die Bewertung nur eine einzige Verteilung von Gewichtungsfaktoren berücksichtigt wurde und unter Umständen bei abweichender Verteilung der Gewichtungsfaktoren gänzlich andere Stadtteile in der Rangliste der zehn geeignetsten Stadtteile auftauchen könnten, wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse wurde das Ziel verfolgt die einzelnen Kriterien, wie sie in Tabelle 1 fett gedruckt dargestellt sind, mit ihrem Gewichtungsfaktor nacheinander auf 100% zu setzen, um neben der vertikalen Bewertung auch eine horizontale Bewertung der Stadtteile vorzunehmen. D.h. die Punkte beim jeweiligen Kriterium gehen zu 100% in die gewichtete Summe und die anderen Kriterien haben keinen Einfluss auf das Ergebnis der Bewertung. Es wurde abwechselnd jeweils ein Kriterium auf 100% gesetzt, während die anderen auf 0% gesetzt wurden. Bei dem Kriterium mit dem Gewichtungsfaktor von 100% wurden die zehn geeignetsten Stadtteile festgehalten. Beim nächsten wurden wieder die zehn geeignetsten Stadtteile festgehalten und fortführend bis alle Kriterien einmal einen Gewichtungsfaktor von 100% hatten. Auf diese Weise konnte gezählt werden, wie oft ein Stadtteil bei der Sensitivitätsanalyse unter den zehn geeignetsten Stadtteilen

fiel. Daraufhin wurde eine neue Rangliste erstellt, die die Stadtteile beinhaltet, die insgesamt am häufigsten in der Rangliste der zehn geeignetsten Stadtteile lagen. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse sind nachfolgend in Tabelle 3 dargestellt. (VDI, 1998)

Ergebnis der Bewertung nach VDI-2225

In der folgenden Abbildung 4 sind die Wertigkeiten nach der Tabelle 2 der einzelnen Stadtteile farblich und räumlich dargestellt. Anhand der geringen Unterschiede der Wertigkeit kann festgehalten werden, dass alle der zehn ausgewählten Stadtteile geeignet erscheinen. Um die Stadtteile als gesetzt zu bestätigen, wurde die bereits erwähnte Sensitivitätsanalyse durchgeführt.

Tabelle 2: Ergebnis der Bewertungsmethodik nach VDI 2225

Rang	Stadtteile	Wertigkeit
1	Mitte	0,70
2	Vahrenwald	0,68
3	List	0,68
4	Linden-Mitte	0,67
5	Oststadt	0,62
6	Südstadt	0,61
7	Groß-Buchholz	0,60
8	Linden-Nord	0,59
9	Oberricklingen	0,57
10	Nordstadt	0,56

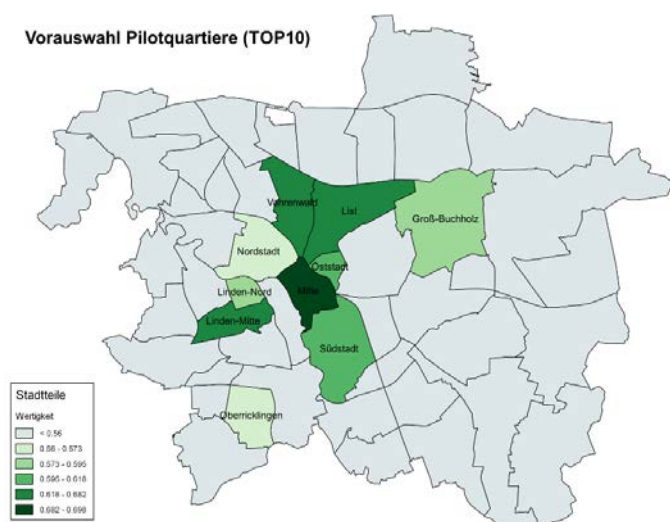


Abbildung 4: Rangliste der zehn geeignetsten Stadtteile als Untersuchungsraum

Ergebnis der Sensitivitätsanalyse

Anhand der Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse in Tabelle 3 wird erkenntlich, dass viele Stadtteile, die nach der VDI-Richtlinie identifiziert wurden, wiederkehrend in der Rangliste der Sensitivitätsanalyse auftauchen. Aufgrund dessen kann eine Auswahl innerhalb der zehn Stadtteile vorgenommen werden.

Tabelle 3: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse

Gesamtranking nach der Sensitivitätsanalyse
nach 7 verschiedenen Bewertungen mit unterschiedlicher Gewichtung

Rang	Nr.	Stadtteil	Anzahl Platzierungen in Top 10	
1	34	Linden-Mitte	6	von 7
2	10	List	5	von 7
2	1	Mitte	5	von 7
4	11	Vahrenwald	4	von 7
4	33	Linden-Nord	4	von 7
4	4	Südstadt	4	von 7
4	25	Groß-Buchholz	4	von 7
4	35	Linden-Süd	4	von 7
4	41	Oberricklingen	4	von 7
10	9	Oststadt	3	von 7

Entscheidung zur Auswahl der Untersuchungsräume

Die Auswahl fiel, wie in der Abbildung 5 dargestellt, auf die Stadtteile Mitte, Oststadt/ List und Groß-Buchholz. Obwohl bei der Auswahl nicht nach den optimalen Wertigkeiten entschieden wurde, kann durch den räumlichen Bezug der Stadtteile davon ausgegangen werden, dass der logistische Versorgungszusammenhang detaillierter untersucht werden kann. Zudem wird über die räumliche Distanz sichergestellt, dass sich die Diversität der Bebauungs- und Siedlungsstruktur unterscheidet. Die ausgewählten Stadtteile stehen beispielhaft für die Entwicklungsstruktur vieler europäischer Städte. Mit ihnen ist die Grundlage für weitere wissenschaftliche Fragestellungen gelegt. Unter anderem kann für die unterschiedlichen Untersuchungsräume analysiert werden, welche Logistikkonzepte sich am ehesten eignen, um die vorher genannten Ziele zu erreichen. Von besonderem Interesse ist dabei die Fragestellung, wie sich die Auswirkungen der Logistikkonzepte in den verschiedenen Bebauungs- und Siedlungsstrukturen unterscheiden. Vermutlich kann die Belieferung durch ein Lastenfahrrad im Kontext eines innerstädtischen Kerngebietes effizienter gestaltet werden als in einem vorörtlichen Stadtteil, da die Kundendichte mit der Entfernung vom Kerngebiet abnehmen könnte.



Abbildung 5: Ausgewählte Untersuchungsräume im Projekt USEFUL

Ausblick über nachfolgende Arbeiten

Um das logistikrelevante Verhalten von Einwohnern und Unternehmen zu erfassen, wurden Umfragen durchgeführt. Dabei wurden in der Unternehmensbefragung Informationen über die Größe der Fahrzeugflotten, die Anzahl der Schichten, durchschnittliche gefahrene Kilometeranzahl pro Tour etc. gesammelt. Im Rahmen der Einwohnerbefragung wurde zum einen die Akzeptanz zu aktuellen Trends von Mobilitätsangeboten und zum anderen das Einkauf- und Bestellverhalten von Einwohnern untersucht. Mit den ausgewählten Untersuchungsräumen und gesammelten Informationen können nun die Simulationen zum Verkehr in Hannover begonnen werden, um Hannover modellhaft abzubilden. Anhand des Modells können die Auswirkungen von verschiedenen Logistikkonzepten analysiert werden. Von besonderem Interesse könnte beispielsweise die Lieferung von Lebensmitteln aus einem Online-Supermarkt sein. Mit dem Hintergedanken, dass mehrere Haushalte über ein Lieferfahrzeug versorgt werden, anstatt selbst mit dem privaten PKW zum Einkauf zu fahren, könnten unter Umständen 18-87% der CO₂-Emissionen eingespart werden. (Siikavirta et. al. 2002)

Um Aussagen wie diese zu prüfen, ist ein Simulationsmodell der Stadt Hannover unerlässlich, da gerade in dem Fall von Lieferungen aus dem Online-Supermarkt auch andere Einflussgrößen eine zentrale Rolle spielen. Durch eine CO₂-freundliche Lieferung der Lebensmittel gewinnen die Kunden auch Zeit für andere Aktivitäten. Die Sekundäreffekte sollen in Folgeprojekten untersucht werden.

Literaturverzeichnis

Deilmann, C.; et al. (2017): Stadt im Spannungsfeld von Kompaktheit, Effizienz und Umweltqualität. Anwendungen urbaner Metrik. Berlin Heidelberg: Springer.

Siikavirta, H., M. Punakivi, M. Karkkainen, and L. Linnanen: Effects of E-Commerce on Greenhouse Gas Emissions: A Case Study of Grocery Home Delivery in Finland. Journal of Industrial Ecology 6, (2002): 83-98.

Landeshauptstadt Hannover (Hrsg.) (2018): Strukturdaten der Stadtteile und Stadtbezirke 2018. Hannover. (Online unter: <https://www.hannover.de/Leben-in-der-Region-Hannover/Politik/Wahlen-Statistik/Statistikstellen-von-Stadt-und-Region/Statistikstelle-der-Landeshauptstadt-Hannover/Strukturdaten-der-Stadtteile-und-Stadtbezirke>, Stand: 01.07.2019)

Landeshauptstadt München, Referat für Stadtplanung und Bauordnung (Hrsg.) (2016): Stadtteilstudie. Fortschreibung 2015. München. (Online unter: https://www.muenchen.de/rathaus/dam/jcr:1b6d455d-798a-4947-ab57-b8d07d17c7f9/LHM_Stadtteilstudie_Webversion_04.pdf, Stand: 01.07.2019)

VDI 2225 Bl. 3 Konstruktionsmethodik (1998): Technisch-wirtschaftliches Konstruieren. Technisch-wirtschaftliche Bewertung.

Zukunftsinstitut GmbH (Hrsg.) (2018): Urbanisierung: Die Stadt von morgen. (Online unter: <https://www.zukunftsinstitut.de/artikel/urbanisierung-die-stadt-von-morgen>, Stand: 02.07.2019)

Akkubedingte Grenzen der Auslastung eines automatischen Pedelec-Vermietsystems

Bedrunka, Alexander

Einleitung

Einen aktuell deutlich sichtbaren Baustein zur Elektromobilitätswende in Deutschland stellen Elektrofahrräder dar, also Fahrräder, die mit einem zusätzlichen Elektromotor ausgestattet sind. Dies spiegelt sich in den Absatzzahlen wieder, die von 380.000 in 2012 auf 720.000 in 2017 angestiegen sind (Zweirad-Industrie-Verband e. V. 2018).

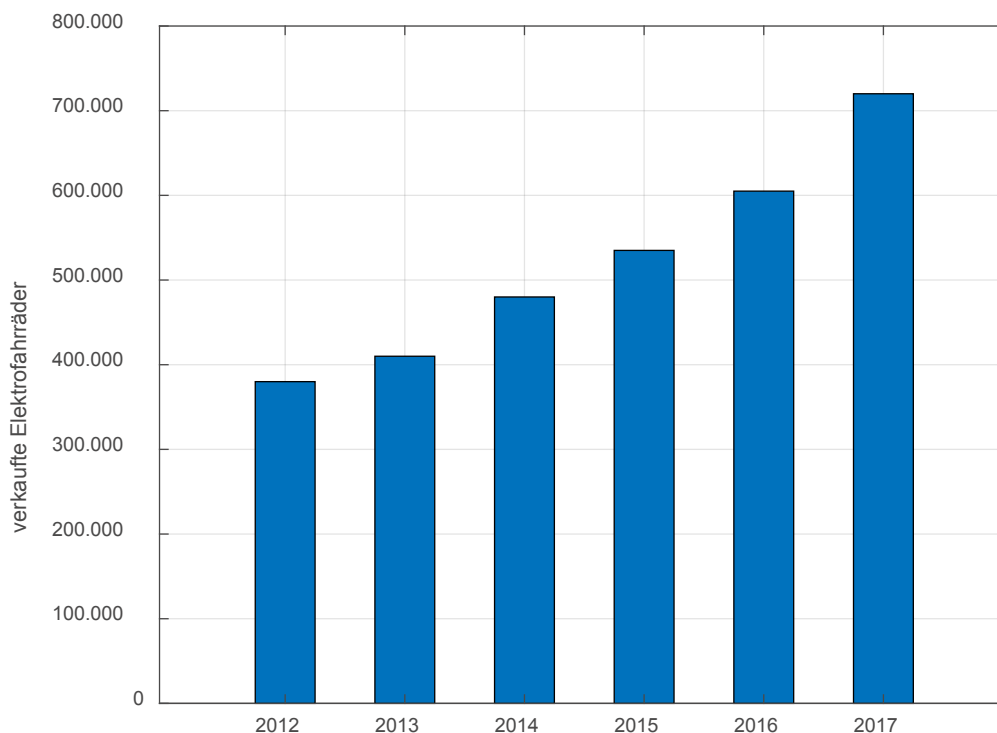


Abbildung 1: Verkaufszahlenentwicklung von Elektrofahrrädern in Deutschland von 2012 bis 2017 (Zweirad-Industrie-Verband e. V. 2018)

Eine besondere Form des Elektrofahrrades ist das Pedelec, bei dem die Motorunterstützung beim Treten in die Pedale erfolgt und sich mit zunehmender Geschwindigkeit progressiv verringert, bis sie bei 25 km/h abschaltet (Müller und Müller 2011). Neben dem Privatgebrauch sind Pedelecs auch für Vermietsysteme geeignet. Denn zu den Vorteilen von konventionellen Fahrradvermietsystemen (FVS) (Entlastung des Verkehrs, Stauvermeidung, Reduktion von CO₂-Emissionen etc.) lassen sich Strecken selbst bei Gegenwind oder Steigungen ohne große Anstrengung zurücklegen.

Im Rahmen von zwei Projekten („mobile4e – Hochschuloffensive Elektromobilität“ und „eRad in Freizeit und Tourismus“) in der Förderinitiative „Schaufenster Elektromobilität“ hat die Hochschule Hannover ihre Forschung auf Pedelecs vertieft. Innerhalb der Projekte wurde ein Datenlogger entwickelt, über den fahrrelevante Daten vom Pedelec aufgezeichnet werden können. Ein Resultat der Projekte ist darüber hinaus das Pedelec-Café der Hochschule Hannover, wo Pedelecs kostenlos an Mitarbeiter und Studierende verliehen werden. Durch die hohe Auslastung ergibt sich ein entsprechend großer Datenpool, um Fahrzyklen zu entwickeln und das Nutzungsverhalten zu analysieren. Zusätzlich werden im Folgeprojekt „Elektromobilitätszuwachs durch optimierte Pedelec-Verleihsysteme (OptiPeds)“ Erfolgsfaktoren für automatische Pedelec-Vermietsysteme (PVS) identifiziert und Handlungsstrategie für zukünftige Vermietsystem abgeleitet.

Ein wichtiges Element in automatischen PVS stellt der Akku des Pedelecs dar. Er beeinflusst, wie viele Mietvorgänge am Tag mit einem Pedelec durchgeführt werden können und wie lange ein Mietvorgang mit elektrischer Unterstützung dauern kann. Im Folgenden wird daher betrachtet, inwiefern der Akku eine mögliche Schwachstelle im System sein kann und welche Auswirkungen dies mit sich zieht.

Funktionsweise von automatischen Pedelec-Vermietsystemen

Ähnlich wie konventionelle FVS können PVS sowohl manuell als auch automatisch betrieben werden (Midgley 2011). Bei einem manuellen Betrieb werden die Mietvorgänge, also die Ausgabe und die Annahme der Pedelecs, vom Personal durchgeführt. Durch die personalintensive Vermietung steigen die Personalkosten mit der Anzahl der Mietvorgänge an. Eine Möglichkeit, dem entgegenzuwirken, ist die Kooperation mit lokalen Geschäften, bei denen die vorhandenen Mitarbeiter zusätzlich zu ihrer Hauptbeschäftigung die Vermietung der Pedelecs übernehmen (Gris Orange Consultant 2009). Eine 24-Stunden-Verfügbarkeit ist wegen der Personalkosten aus wirtschaftlicher Sicht nicht sinnvoll. Ein Vorteil des manuellen Betriebs ist die direkte Betreuung durch das vorhandene Personal, das dem Kunden eine kurze persönliche Einführung in die Funktionsweise des Pedelecs geben kann. Ein manuelles Vermietsystem eignet sich vorwiegend an Orten, an denen täglich mit wenigen Mietvorgängen zu rechnen ist oder die Pedelecs für einen längeren Zeitraum vermietet werden (bspw. touristische Gebiete).

Ein automatisches PVS besteht aus einer Flotte von Pedelecs, die an festinstallierten Stationen gemietet und zurückgegeben werden können (Cherry et al. 2010). Beim Mietvorgang hat die Station die Aufgabe, den Kunden zu identifizieren und ihm Zugang zu den Pedelecs zu

gewähren. Bei der Rückgabe muss das Pedelec erkannt werden, um eine einwandfreie Abrechnung für den Kunden zu gewährleisten. Zusätzlich sind die Stationen mit der Zentrale des Betreibers verbunden, um in Echtzeit die Anzahl der Pedelecs an den jeweiligen Stationen abrufen zu können. Bei hochfrequentierten Stationen können sich viele Pedelecs an einem Ort befinden, sodass von der Zentrale aus die Redistribution eingeleitet werden muss. Gleichzeitig besitzen die Stationen insgesamt mehr Stellplätze als Pedelecs im System vorhanden sind, damit eine reibungslose Rückgabe der Pedelecs ermöglicht werden kann. Für Vermietsysteme in europäischen Großstädten werden im Durchschnitt 1,7 Abstellplätze pro Fahrrad vorgesehen (Büttner und Mlasowsky 2011).

Neben dem Schutz vor Diebstählen und Wettereinflüssen sollen die Terminals auch eine Möglichkeit für die Kunden bieten, Feedback über Fahrten zu geben oder Mängel an den Pedelecs zu melden, damit diese schnellstmöglich behoben werden können. Im Gegensatz zum manuellen Betrieb wird bei einem automatischen System kein Personal für die Mietvorgänge benötigt. Hierbei befinden sich die Pedelecs in elektronisch gesteuerten Abstellplätzen, in denen die Pedelecs gesichert sind. Über ein Terminal erfolgen die Identifikation des Kunden sowie die Zuordnung eines Pedelecs. Diese Variante ist zwar weniger personalintensiv, verursacht jedoch aufgrund der zusätzlichen Technik insgesamt höhere Anschaffungskosten. Eine 24-Stunden-Verfügbarkeit lässt sich problemlos realisieren (Monheim 2012), allerdings muss für die Kundenbetreuung ein Kundenservice eingerichtet werden. Automatische Vermietsysteme sind dort praktikabel, wo Pedelecs täglich mit einer hohen Frequenz für einen kurzen Zeitraum vermietet werden (bspw. urbaner Raum für den Alltagsgebrauch) (Toole Design Group, LLC and Foursquare ITp 2013).

Aktuell werden in den USA stationslose automatische PVS untersucht. Dabei können die Pedelecs vom Kunden an einem beliebigen öffentlich zugänglichen Ort im vom Betreiber definierten Bereich abgestellt werden. Der Akku wird von Mitarbeitern des Betreibers bei Bedarf ausgetauscht. Bei stationslosen System herrscht jedoch die Gefahr, dass der Vandalismus zunimmt und Pedelecs nicht ordnungsgemäß abgestellt werden.

Einflussfaktoren in automatischen Vermietsystemen

Innerhalb des Projektes „Optimising Bike Sharing in European Cities (OBIS)“ wurden unterschiedliche FVS aus Europa analysiert und mögliche Einflussfaktoren identifiziert, die auf die Miethäufigkeit im System wirken können (Büttner und Mlasowsky 2011). Von den Grundstrukturen sind FVS und PVS sehr ähnlich aufgebaut und unterscheiden sich lediglich durch die Elektronik am Pedelec. Daher lassen sich die Einflussfaktoren auf PVS übertragen.

Bei den Einflussfaktoren wird zwischen endogenen und exogenen Faktoren unterschieden (Tabelle 1). Endogene Faktoren sind beeinflussbare Veränderungen auf das Vermietsystem wie bspw. die Art des Pedelegs oder der Station sowie die Registrierungs- und Nutzungsgebühr. Exogene Faktoren sind von der jeweiligen Stadt abhängig und können nicht oder nur im geringen Maße verändert werden. Beispiele hierfür sind die Stadtgröße, das Klima oder die Infrastruktur.

Tabelle 1: Endogene und exogene Faktoren in automatischen Vermietsystemen nach (Büttner und Mlasowsky 2011)

Endogene Faktoren	Exogene Faktoren
Technische Systemgestaltung	Stadtgröße
Hardware und Technologie	Klima
Systemdesign	Mobilitätsverhalten
Organisatorische Systemgestaltung	Bevölkerungsdichte
Betreiber	Demographische Faktoren
Verträge	Ökonomische Faktoren
Kosten und Finanzierung	Geographische Faktoren (z. B. Topographie)
	Infrastruktur
	Finanzielle Situation
	Politik

Insbesondere die exogenen Faktoren sind verantwortlich für die Anzahl potentieller Kunden, die das System nutzen wollen. Damit im Idealfall alle Anfragen dieser Kunden erfüllt werden können, muss das System entsprechend ausgelegt werden. Beim PVS kommt neben einer ausreichend hohen Stationsdichte und genügend Pedelegs auch der Energiegehalt des Akkus hinzu. Ein zu geringer Energiegehalt führt dazu, dass der Akku regelmäßiger geladen werden muss. In dieser Zeit steht das Pedeleg nicht zur Verfügung. Die Wahrscheinlichkeit steigt, dass für eine Anfrage kein Pedeleg an der Station vorhanden ist. Eine generelle Aussage, welcher Energiegehalt ausreichend ist bzw. mindestens vorhanden sein muss, kann nicht pauschal getroffen werden, da der Energiegehalt maßgeblich von der notwendigen Leistung beim Fahren bestimmt wird.

Es gibt viele verschiedene Einflussfaktoren auf die Leistung beim Fahren eines Pedelegs, die aus den Zusammenhängen der physikalischen Grundlagen resultieren (Gressmann et al. 2015; Abagnale et al. 2015; Schramm et al. 2014; Wilson et al. 2004). Für eine systematische Einteilung dieser Faktoren wird in (Bedrunka und Gusig 2015, 2016) ein mehrdimensionaler

Parameterraum für den Pedelec-Bereich beschrieben. Dabei werden alle Einflussfaktoren in eine der Kategorien „Fahrer“, „Fahrumgebung“ und „Pedelec“ eingeteilt, um viele unterschiedliche Fahrszenarien individualisiert betrachten zu können (Abbildung 2).

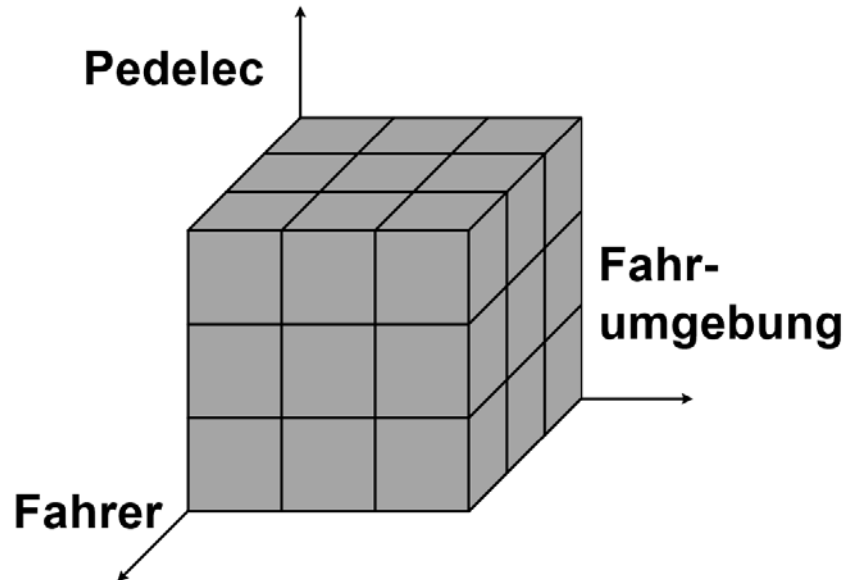


Abbildung 2: Mehrdimensionaler Parameterraum für Pedelecs nach (Bedrunka und Gusig 2016)

Die Einteilung aller Einflussfaktoren ist in Tabelle 2 aufgeführt. Für den Fahrer werden Faktoren betrachtet, die sich auf die Fahrweise und auf die physikalischen Eigenschaften beziehen. Bei der Fahrumgebung spielt vor allem das Höhenprofil eine entscheidende Rolle. Die identifizierten Einflussfaktoren für die Kategorie „Pedelec“ sind für ein gegebenes Rad weitestgehend konstant. Allerdings kann sich der mechanische Wirkungsgrad bei mangelhafter Wartung der Pedelecs reduzieren, was zu einer höheren Leistung führt. Im Idealfall sind alle Einflussfaktoren zu jedem Zeitpunkt bekannt, um eine Häufigkeitsverteilung des Energiebedarfs pro Fahrt in Abhängigkeit der drei Kategorien individuell erstellen zu können.

Tabelle 2: Einteilung der identifizierten Einflussfaktoren in die Kategorien des mehrdimensionalen Parameterraumes nach (Bedrunka und Gusig 2015)

Fahrer	Fahrumgebung	Pedelec
Geschwindigkeitsprofil	Höhenprofil	Gewicht
Gewicht	Fahrbahn	Stirnfläche
Stirnfläche	Wind	Mechanischer Wirkungsgrad
Fahrposition	Temperatur	Elektrischer Wirkungsgrad
Motorunterstützungslevel		Akkutyp

Trittfrequenz		Reifen- und Felgengröße
		Motor (Typ und Position)
		Dynamo- und Schaltungstyp

Alle Daten über einen langen Zeitraum zu erfassen ist theoretisch möglich. In der Praxis ist die jedoch schwer umzusetzen, da sich Faktoren wie bspw. die Stirnfläche des Fahrers oder der mechanische Wirkungsgrad stark dynamisch ändern können.

Über den an der Hochschule Hannover entwickelten Datenlogger lässt sich jedoch die Leistung anhand des Akkustroms und der Akkuspannung ermitteln. Über den vorhandenen Datenpool der Hochschule Hannover wurden 615 Fahrten, die hauptsächlich in Hannover durchgeführt wurden, ausgewertet. Hierbei wurde die durchschnittliche Leistung für die jeweilige Fahrt ermittelt. Die Auswertung zeigt eine Normalverteilung der durchschnittlichen Akkuleistung (Abbildung 3). Im Durchschnitt werden demnach 123,92 W aufgewendet.

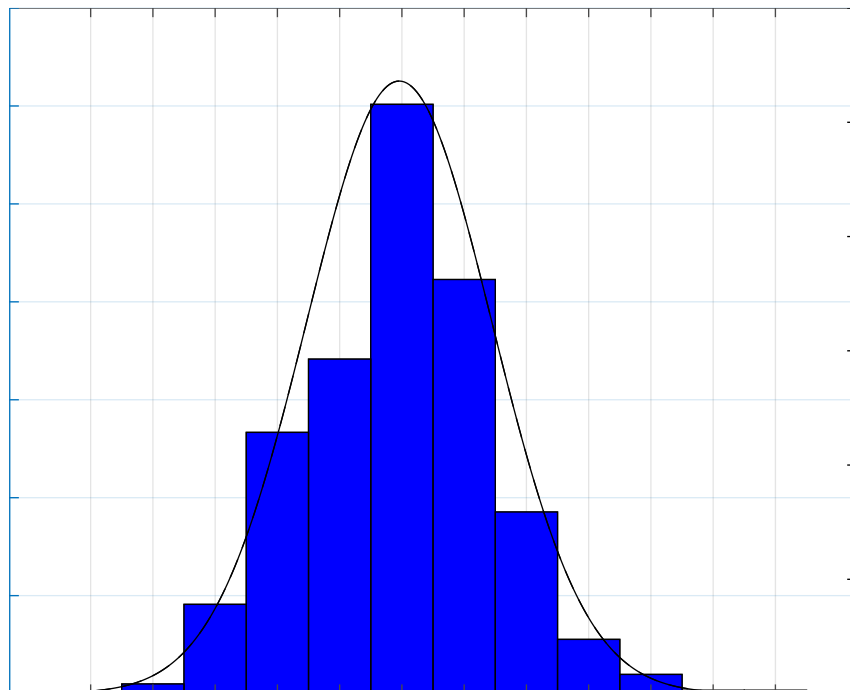


Abbildung 3: Häufigkeits- und Wahrscheinlichkeitsverteilung der durchschnittlichen Akkuleistung für eine Fahrt in Hannover ($\mu = 123,92$ W, $\sigma = 37,21$ W)

Zur Abschätzung eines ausreichend hohen Energiegehaltes müssen weitere Faktoren berücksichtigt werden. Hierbei spielen neben der Anzahl der Mietvorgänge, die mit dem Pedelec durchgeführt werden, auch die dazugehörige Dauer sowie der Zeitpunkt des

Mietvorganges. Eine entsprechende Analyse wird aktuell im Rahmen eines Promotionsvorhabens vom Autor durchgeführt und soll deshalb in diesem Zusammenhang nicht weiter vertieft werden.

Thermischer Betriebsbereich der Pedelecs und dessen Auswirkungen auf das System

Einschränkungen für den Betrieb eines PVS werden durch die Ladetemperatur des Akkus bzw. die Betriebstemperatur der Antriebseinheit vorgegeben. Bei niedrigen Temperaturen nimmt die Leitfähigkeit des Elektrolyts in der Akkuzelle ab. Gleichzeitig steigt der Widerstand an der Grenzschicht (Ji et al. 2013). Das hat zur Folge, dass sich die Kapazität reduziert, sobald die Temperatur sinkt. Mit zunehmender Temperatur steigt die Kapazität wieder. Der Betrieb bei Temperaturen oberhalb des Auslegungsbereiches führt zu irreparablen Schäden in der Zelle (Leng et al. 2015). Daraus ergeben sich bspw. für den Akku aus der Active Line Serie der Robert Bosch GmbH die Betriebs- und Ladetemperaturbereiche aus Tabelle 3. Für die Antriebseinheit darf eine Temperatur von -5 °C nicht unterschritten werden, da diese sich ansonsten abschaltet und keine Unterstützung mehr erfolgen kann.

Tabelle 3: Verschiedene Temperaturbereiche für den Akku und die Antriebseinheit des Systems *Active Line* (Robert Bosch GmbH 2015)

	Akku	Antriebseinheit
Betriebstemperatur	-10...+40 °C	-5...+40 °C
Lagertemperatur	-10...+60 °C	-10...+50 °C
Zulässiger Ladetemperaturbereich	0...+40 °C	-

Ein Unterschreiten der zulässigen Betriebs- und Ladetemperatur kann vor allem in den Wintermonaten auftreten. Die durchschnittliche Temperatur ist in den Jahren 2011 bis 2017 in Hannover an drei Tagen unter -10 °C gefallen. Das entspricht in etwa 0,12 % und ist damit vergleichsweise unwahrscheinlich. Eine durchschnittliche Temperatur von unter -5 °C wurde in diesem Zeitraum an 27 Tagen erreicht (~1,06 %) und wurde überwiegend in den Monaten Januar und Februar unterschritten.

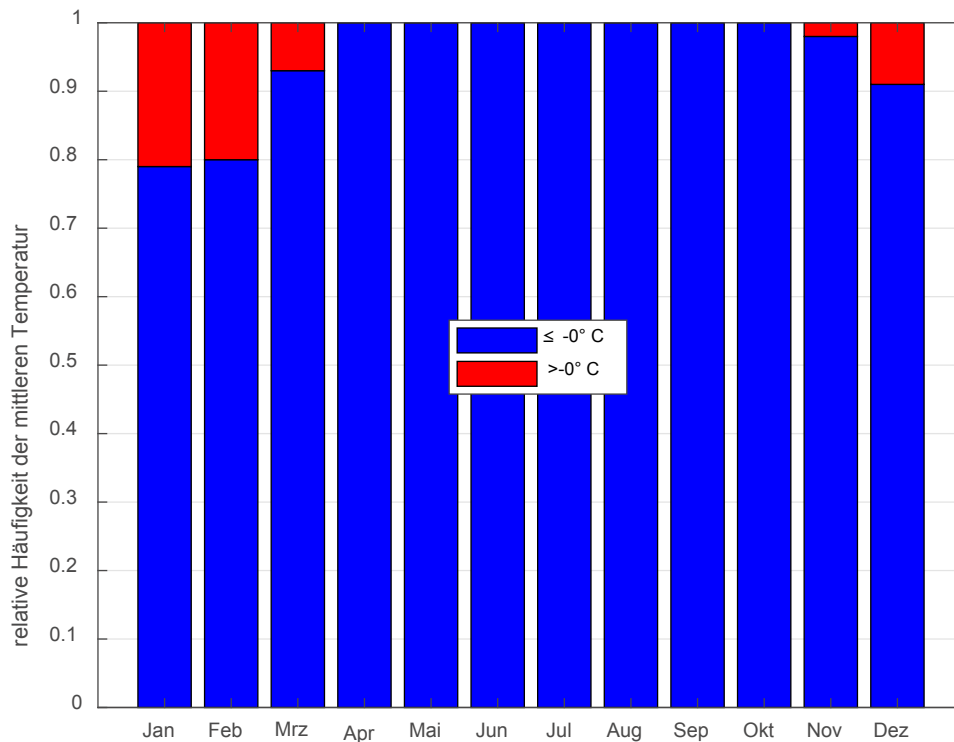


Abbildung 4: Relative Häufigkeit der mittleren Temperatur über bzw. unter 0 °C in den jeweiligen Monaten von 2011 bis 2017 für Hannover

Die zulässige Ladetemperatur für den Akku stellt mit einem Temperaturbereich von 0 bis 40 °C die größte Herausforderung dar. Die Verteilung der mittleren Temperatur in Hannover zeigt, dass von November bis März die Gefahr besteht, 0 °C zu unterschreiten (Abbildung 4), sodass eine Lademöglichkeit an diesen Tagen nicht gewährleistet ist. Eine Möglichkeit, das Pedelec und somit den Akku im Winter zu temperieren, stellen geschlossene Systeme dar. Dabei werden die Pedelecs in Boxen abgestellt, die bei Bedarf auch beheizt werden können. Die Temperierung würde allerdings sowohl zusätzliche Anschaffungs- als auch Betriebskosten verursachen. Es ist demnach abzuwägen, wieviel Aufwand betrieben werden soll, um einen ganzjährigen Betrieb des Systems aufrechtzuerhalten. Hinzu kommt, dass die Nutzung des Systems in den Wintermonaten stark zurückgehen kann.

Der Einfluss der Temperatur auf die Anzahl der Mietvorgänge kann durch die Auswertung von vorhanden Systemen über ein Regressionsmodell dargestellt werden. Exemplarisch wird hier das System B-Cycle in Denver (Colorado) betrachtet. Die folgenden Berechnungen werden mit Hilfe der Software Matlab durchgeführt. Als Signifikanzniveau wird bei allen Berechnungen 5 % angenommen.

Für das Regressionsmodell wird die Anzahl der täglichen Mietvorgänge pro Fahrrad als Regressand festgelegt. Der Bezug zur Anzahl der Fahrräder ist wichtig, da die betrachteten

Systeme stetig vergrößert werden. Gleiche Wetterbedingungen würden zu unterschiedlichen Zeitpunkten zwangsläufig zu einer unterschiedlichen Anzahl an Mietvorgängen führen, da deutlich mehr Fahrräder als vorher im System sind. Eine absolute Anzahl von 1.000 täglichen Mietvorgängen mit 200 Fahrrädern (5 Mietvorgänge pro Fahrrad) im Sommer hat demnach eine andere Bedeutung als mit 5.000.

Im untersuchten Vermietsystem wird die Anzahl der täglichen Mietvorgänge pro Fahrrad n maßgeblich von der mittleren Temperatur T_{mittel} (in °C) bestimmt. Der Zusammenhang lässt sich mit Hilfe einer rationalen Funktion berechnen und darstellen:

$$n(T_{\text{mittel}}) = \frac{b_0}{T_{\text{mittel}}^2 + b_1 \cdot T_{\text{mittel}} + b_2} \quad (1)$$

Sowohl für den t-Test aller Regressionsparameter als auch den F-Test für das Gesamtmodell kann die Nullhypothese aufgrund der jeweiligen p-Werte verworfen werden (Tabelle 5). Das bedeutet, dass zwischen Regressoren und Regressand ein signifikanter Einfluss vorhanden ist.

Tabelle 4: Ergebnisse des Regressionsmodells für den dynamischen Verlauf auf Datenbasis des FVS in Denver

	Regressions- koeffizient	Standardfehler	t-Test	p-Wert
b_0	530,64	29,05	18,27	$<<0,01$
b_1	-42,93	0,65	-65,69	$<<0,01$
b_2	679,86	24,78	27,44	$<<0,01$

Mittlere quadratische Abweichung: 0.396

Korrigiertes Bestimmtheitsmaß R^2 : 0.761

p-Wert des Gesamtmodells $<< 0,01$

Mit zunehmender mittlerer Temperatur nimmt die Anzahl der täglichen Mietvorgänge pro Fahrrad zu. Ab einer mittleren Temperatur von 20 °C flacht der Verlauf ab und fällt bei 23 °C wieder leicht (Abbildung 5). Der Anwendungsbereich des Modells deckt eine mittlere Temperatur von -15 °C bis 27 °C ab.

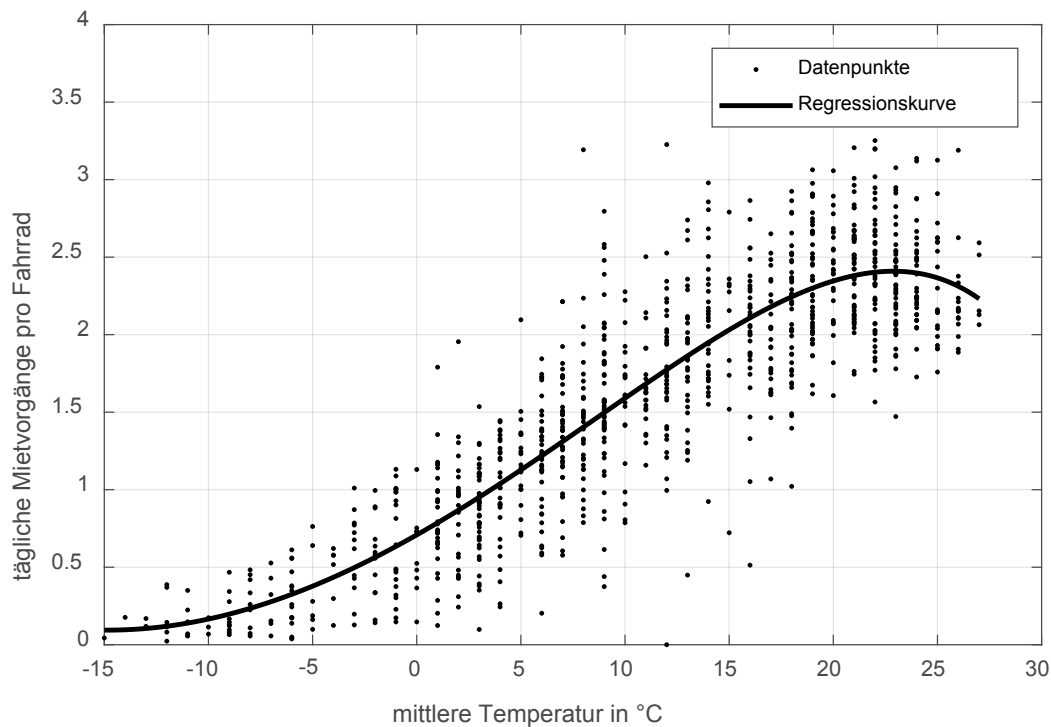


Abbildung 5: Auf Basis der Datenpunkte ermittelte Regressionskurve für das FVS in Denver zur Berechnung der täglichen Mietvorgänge pro Pedelec in Abhängigkeit von der mittleren Temperatur

Durch die Kombination des Regressionsmodells mit der mittleren Temperatur für Hannover für die Jahre 2015 – 2017 ergibt sich der Verlauf für die Mietvorgänge pro Pedelec in Abbildung 6. Der Verlauf soll lediglich demonstrieren, wie sich die Nachfrage in einem PVS in Hannover verhalten kann, wenn das System wie im Regressionsmodell von der Temperatur beeinflusst werden würde.

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Anzahl der Fahrten in den Wintermonaten abnimmt. Dies führt u.a. zu Umsatzeinbußen beim Betreiber. Demnach ist für den Betrieb eines PVS zu überlegen, ob ein ganzjährige Öffnung des Systems sinnvoll ist. Zusätzlich zu den Umsatzeinbußen können sich nämlich die Wartungskosten in den Wintermonaten erhöhen (Toole 2016). Die Kombination aus feuchtem Wetter und mit Streusalz behandelten Straßen erhöht die Anfälligkeit von Korrosion am Pedelec. Zusätzlicher Schmutz auf der Fahrbahn steigert den Verschleiß der Pedelec-Komponenten. Dieser Nachteil ist bei einem saisonalen Betrieb nicht gegeben. Darüber hinaus können die jeweiligen Monate, in denen das System nicht geöffnet hat, dazu genutzt werden, notwendige Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten an den Pedelecs und Stationen durchzuführen. Neben der Wartung der Pedelecs müssen die Stationen regelmäßig gereinigt bzw. von Schnee befreit werden. Bei einem saisonalen Betrieb wird ein Großteil des Personals nur in den aktiven Monaten benötigt. Dies kann zwar für

Einsparungen in den jährlichen Betriebskosten sorgen, setzt aber auch voraus, dass Personal zum Start der neuen Saison gefunden wird.

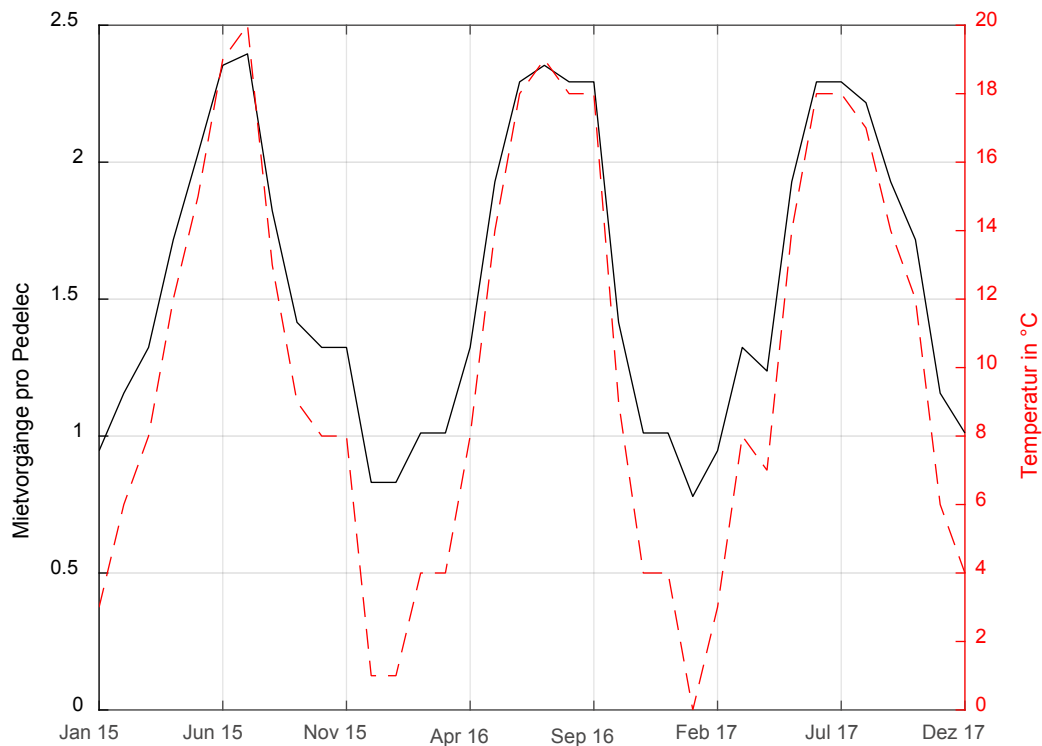


Abbildung 6: Ermittelter Verlauf der Mietvorgänge pro Pedelec in Abhängigkeit der mittleren Temperatur von 2015 bis 2017 in Hannover anhand des entwickelten Regressionsmodells

Zusätzliche Betriebskosten fallen im saisonalen Betrieb lediglich durch die Lagerkosten der Pedelecs an. Hierbei besteht die Möglichkeit, die Pedelecs nach einer Saison wieder zu verkaufen. Dies bietet neben der Einsparung der Lagerkosten auch den Vorteil, die Wartungskosten im Folgejahr wieder auf ein Minimum zu reduzieren. Demgegenüber können durch den Verkauf potentielle Kunden für die folgende Saison verloren gehen. Neben den finanziellen und materiellen Aspekten muss das Thema Sicherheit berücksichtigt werden. Durch Schnee und glatte Straße entsteht für Pedelec-Fahrer ein erhöhtes Unfallrisiko, das durch die höhere Geschwindigkeit gegenüber konventionellen Fahrrädern gesteigert wird. In diesem Zusammenhang ist die Zusammenarbeit mit der örtlichen Straßenreinigung notwendig, sodass die vorgesehenen Radwege mit Streugut präpariert werden. Ein ganzjähriger Betrieb hat wiederum den Vorteil, dass sich die Stammkunden nicht auf ein anderes Verkehrsmittel einstellen müssen. Darüber hinaus sind keine intensiven Werbemaßnahmen zur Wiedereröffnung des Systems notwendig, um die Bevölkerung über die Wiedereröffnung in Kenntnis zu setzen (Goff 2016). Eine Steigerung der Nutzungshäufigkeit sowie des Vertrauens in das System können die Folge sein.

Bei der Entscheidung für oder gegen einen ganzjährigen Betrieb eines automatischen PVS spielt die Elektronik eine entscheidende Rolle. Aufgrund der Ladetemperatur des Akkus muss gewährleistet sein, dass ein Ladevorgang auch bei Temperaturen außerhalb des Ladebereichs stattfinden kann. Darüber hinaus muss damit gerechnet werden, dass das System bei Temperaturen außerhalb des Betriebsbereiches der Antriebseinheit temporär geschlossen wird. Ein durchgängiger Betrieb ist daher nur mit erhöhtem Aufwand zu realisieren.

Zusammenfassung

Der Einsatz von Pedelecs in automatischen Vermietsystemen bietet aufgrund der elektrischen Unterstützung den Vorteil der anstrengungsfreien Fortbewegung. Damit eine hohe Verfügbarkeit der Pedelecs in einem solchen System gewährleistet ist, muss der Akku für das vorhandene Einsatzgebiet ausgelegt sein. Hierbei sind vor allem Einflussfaktoren in Hinblick auf den Fahrer, die Fahrumgebung und das Pedelec zu beachten. Eine Auswertung der Fahrdaten, die mit den Pedelecs der Hochschule Hannover aufgenommen wurden, zeigt, dass die durchschnittliche Akkuleistung pro Fahrt normalverteilt ist. Der Erwartungswert liegt bei 123,92 W. Je nach erwarteter Auslastung des Systems muss ein ausreichend großer Energiegehalt beim Akku gewählt werden, um möglichst viele Anfragen durchführen zu können.

Neben der Festlegung des Energiegehaltes muss auch der thermische Betriebsbereich des Akkus berücksichtigt werden. Mit einem zulässigen Ladetemperaturbereich von 0 bis 40 °C kann das System in den Wintermonaten deutlich eingeschränkt werden. Am Beispiel der mittleren Temperatur von 2011 bis 2017 in Hannover ist die Wahrscheinlichkeit einer Temperaturunterschreitung in den Monaten Januar und Februar (ca. 20 %) am größten. Der signifikante Einfluss der Temperatur auf die Mietvorgänge pro Pedelec wurde anhand eines Regressionsmodells auf Datenbasis des Vermietsystems B-Cycle in Denver, Colorado, dargestellt. Die Anwendung des Modells auf Hannover zeigt in den Wintermonaten einen deutlichen Rückgang der Mietvorgänge. Eine Entscheidung für oder gegen einen ganzjährigen Betrieb ist in Hinblick auf die vorhandene Elektronik vor allem bei Temperaturen unter 0 °C schwer aufrechtzuerhalten.

Literaturverzeichnis

- Abagnale, Carmelina; Cardone, Massimo; Iodice, Paolo; Strano, Salvatore; Terzo, Mario; Vorraro, Giovanni (2015): Power requirements and environmental impact of a pedelec. A case study based on real-life applications. In: *Environmental Impact Assessment Review* 53, S. 1–7. DOI: 10.1016/j.eiar.2015.02.003.
- Akkerboom, Hans (2010): *Wirtschaftsstatistik im Bachelor. Grundlagen und Datenanalyse*. 2., überarb. Aufl. Wiesbaden: Gabler (Lehrbuch).
- Albright, S. Christian; Winston, Wayne L.; Zappe, Christopher J. (2011): *Data analysis and decision making*. 4th ed. Mason, Ohio: South-Western/Cengage Learning.
- Bedrunka, A.; Gusig, L.-O. (2015): Multidimensional parameter space for an individual prediction of the range in the field of pedelecs. In: C. A. Brebbia (Hg.): *Sustainable Development, Bd. 1: Wit Press (WIT transactions on the built environment)*, S. 901–909.
- Bedrunka, A.; Gusig, L.-O. (2016): Multidimensional Parameter Space for an Individual Prediction of the Range in the Field of Pedelecs. In: Wessex Institute of Technology (Hg.): *Sustainable development, Bd. 2*. Southampton: Wit Press (WIT transactions on the built environment, volume 168), S. 901–909. Online verfügbar unter <http://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/SD15/SD15079FU2.pdf>, zuletzt geprüft am 23.08.2016.
- Bissell, Derek (1994): *Statistical methods for SPC and TQM*. 1st ed. London, New York: Chapman & Hall (Texts in statistical science).
- Büttner, Janett; Mlasowsky, Hendrik (2011): *Optimising Bike Sharing in European Cities. A Handbook*.
- Cherry, Christopher; Worley, Stacy; Jordan, David (2010): *Electric Bike Sharing. System Requirements and Operational Concepts*. Washington, District of Columbia.
- Diller, Hermann (1998): *Marketingplanung*. 2. Aufl. München: Franz Vahlen.
- Goff, Phil (2016): *Overcoming the Challenges of Winter Bike Share*. Winter Cycling Congress. Winter Cycling Federation. Minneapolis, Minnesota, 2016.
- Gressmann, Michael; Müller, Eberhard; Retzbach, Ludwig (2015): *Fachwissen E-Bike. Technik der Leicht-Elektrofahrzeuge*. 2. Aufl. Haan, Rheinland: Europa-Lehrmittel (Europa-Fachbuchreihe für Kraftfahrzeugtechnik).
- Gris Orange Consultant (2009): *Bike sharing guide*. Ottawa, Ontario: Transport Canada (TP, 14931E).
- Ji, Y.; Zhang, Y.; Wang, C.-Y. (2013): Li-Ion Cell Operation at Low Temperatures. In: *J. Electrochem. Soc.* 160 (4), A636-A649. DOI: 10.1149/2.047304jes.
- Leng, Feng; Tan, Cher Ming; Pecht, Michael (2015): Effect of Temperature on the Aging rate of Li Ion Battery Operating above Room Temperature. In: *Scientific reports* 5, S. 12967. DOI: 10.1038/srep12967.
- Midgley, Peter (2011): *Bicycle-sharing Schemes. Enhancing Sustainable Mobility in Urban Areas*. Commission on Sustainable Development. New York.
- Monheim, Heiner (2012): *Fahrradverleihsysteme in Deutschland. Relevanz, Potenziale und Zukunft öffentlicher Leihfahrräder*. Köln: ksv-Verl. (Verkehrsforschung).
- Müller, Teja; Müller, Eberhard (2011): *E-Bike-Technik. Funktion und Physik der Elektrofahrräder*. Norderstedt: Books on Demand.
- Robert Bosch GmbH (2015): *Active Line. 1000 Pläne. Alles erreichbar. Bosch eBike Systems 2015*. Reutlingen. Online verfügbar unter https://www.bosch-ebike.com/fileadmin/EBC/downloads/Broschueren/Bosch-eBike-Active-Line-MY15DE.pdf?_=1461339603, zuletzt geprüft am 09.02.2017.
- Schramm, Dieter; Hiller, Manfred; Bardini, Roberto (2014): *Vehicle Dynamics. Modeling and Simulation*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; Imprint: Springer.
- Sen, Ashish K.; Srivastava, M. S. (1990): *Regression analysis. Theory, methods and applications*. New York: Springer-Verlag (Springer texts in statistics).

Toole, Jennifer (2016): Winter Weather Bike Share Policies and Procedures. Winter Cycling Congress. Winter Cycling Federation. Minneapolis, Minnesota, 2016. Online verfügbar unter <http://wintercyclingcongress2016.org/wp-content/uploads/2016/01/Winter-Weather-Bikeshare1.pdf>.

Toole Design Group, LLC and Foursquare ITP (2013): Philadelphia Bike Share Strategic Business Plan. Philadelphia. Online verfügbar unter <http://www.bikesharephiladelphia.org/philastudy/completebusinessplan.pdf>, zuletzt geprüft am 13.09.2016.

Urban, Dieter; Mayerl, Jochen (2011): Regressionsanalyse. Theorie, Technik und Anwendung. 4., überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: VS, Verl. für Sozialwiss. (Studienskripten zur Soziologie).

Wilson, David Gordon; Papadopoulos, Jim; Whitt, Frank Rowland (2004): Bicycling science. 3rd ed. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.

Zweirad-Industrie-Verband e. V. (2018): Zahlen - Daten - Fakten zum Fahrradmarkt in Deutschland 2017. ZIV Wirtschaftspressekonferenz. Berlin, 13.03.2018. Online verfügbar unter http://www.ziv-zweirad.de/fileadmin/redakteure/Downloads/Marktdaten/PK-2018_13-03-2018_Praesentation.pdf, zuletzt geprüft am 03.07.2018.

Methodik zur Reichweitenbestimmung von leichten Elektrofahrzeugen der Klassen L1e bis L6e mit einer Geschwindigkeit von bis zu 45 km/h

Novikov, Sergej; Adamitz, Dennis

Einleitung

In den letzten Jahren hat die Elektromobilität für die Gesellschaft in Deutschland zunehmend an Bedeutung gewonnen, fossile Brennstoffe zu schonen und mit steigenden Ölpreisen möglicherweise Kosten zu sparen sind zentrale Punkte. Die Zielsetzung der Bundesregierung, bis 2020 eine Million zugelassene Elektrofahrzeuge auf die Straße zu bringen (NPE 2012), wird voraussichtlich nicht gelingen. Dennoch ist ein starker Anstieg (34% in Jahr 2015) beim Absatz von Elektrofahrzeugen in Deutschland zu verzeichnen. 2018 erreichte die Zulassungszahl von Elektroautos (E-Autos) eine Anzahl von 26000 Stück (KBA 2018).



Abbildung 1: Leichte Elektrofahrzeuge der EG-Klassen L1e bis L6e mit einer Geschwindigkeit von bis zu 45 km / h für die Forschung an der Hochschule Hannover

Neben den konventionellen E-Autos freut sich eine andere Fahrzeugvariante immer größerer Beliebtheit, leichte Elektrofahrzeuge (LEF) der Klassen L1e bis L6e der Europäischen Gemeinschaft mit einer Geschwindigkeit von bis zu 45 km/h bei einer Motorleistung von bis zu 4 kW und einem Leergewicht ohne Batterien von bis zu 350 kg (Schurig 2017). In Abbildung 1 ist eine Auswahl verschiedener LEFs, als Auszug der Forschungsflotte der Hochschule Hannover, abgebildet.

Diese LEFs haben ihre Zulassungszahlen in Deutschland, in den letzten zwei Jahren, fast verdreifacht und erreichen damit eine Zahl von 5600 Fahrzeugen (BEM-Initiative 2016). Als Vergleich dazu fahren in China bereits 200 Millionen Elektroroller auf der Straße (Ankenbrand 2016), was das Potential dieser Fahrzeuge verdeutlicht.

Wie auch bei E-Autos ist die erreichbare Reichweite einer der wichtigsten Faktoren für die Kaufentscheidung eines LEFs (Elektroroller Test 2018). Aufgrund des großen Interesses, eine maximale Reichweite zu erreichen, wird der Reichweitenwert von den Herstellern in der Praxis oft unter idealen Bedingungen (beispielsweise bei konstanter Geschwindigkeit, ohne Steigung und mit einem technisch einwandfreien Fahrzeug) ermittelt und entspricht daher selten der Realität. Folglich ist es ohne standardisierte, vereinheitlichte Tests nicht möglich, verschiedene Fahrzeugtypen korrekt zu vergleichen oder den Herstellerangaben in Bezug auf die maximale Reichweite zu vertrauen.

Als Konsequenz kann das zu einer geringeren Akzeptanz von potenziellen Käufern führen. Für eine reale Entfernungsvorhersage müssen alle Einflussfaktoren berücksichtigt werden. Zur Identifizierung dieser Faktoren müssen die physikalischen Grundlagen des Fahrens erläutert werden.

Stand der Technik

Zurzeit wird in der europäischen Automobilindustrie für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren und Elektromotoren teilweise noch der Testfahrzyklus Neuer Europäischer Fahrzyklus (NEFZ) verwendet. Der NEFZ wurde für Autos mit Verbrennungsmotoren bereits im Jahr 1996 entwickelt und ist nicht mehr zeitgemäß. Deshalb wurde im Jahr 2014 ein neuer Fahrzyklus, der Worldwide harmonized Light Duty Test Cycle (WLTC), entwickelt. Ab dem 1. September 2018 ist für alle neu zugelassene Fahrzeuge der WLTC verbindlich festgeschrieben. Dieser soll den NEFZ ablösen und dient als neue Grundlage zur Ermittlung der Schadstoff- und CO₂-Emissionen, sowie des Kraftstoff- bzw. Stromverbrauches. Ein neuer Fahrzyklus zieht auch ein neues Testverfahren, den Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure (WLTP), mit sich. Dieser umfasst sowohl ein neues Fahrprofil auf Prüfständen, als auch präzisere und aktuellere Rahmenbedingungen des gesamten Tests und soll somit zu realitätsnäheren Verbrauchsangaben führen.

In Abbildung 2 wird der NEFZ (engl. NEDC) mit dem WLTC verglichen.

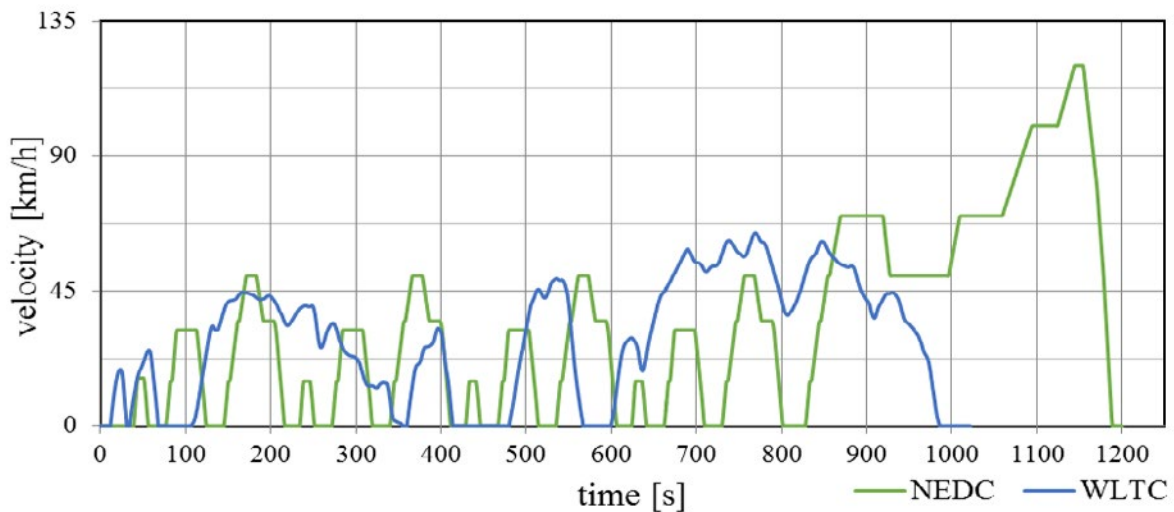


Abbildung 2: NEDC und WLTC Klasse 1 im Vergleich

Der WLTP wurde an die Fahrzeuge mit einem Elektroantrieb angepasst und in drei unterschiedliche Leistungsklassen aufgeteilt (Liebl 2014). In der nachfolgenden Tabelle 1 werden die Klassen des WLTCs aufgeteilt.

Tabelle 1: WLTC Klassen Motorleistung/Nettogewicht

	P_{mr} [W/kg]	Besonderheit V [Km/h]	V_{max} [Km/h]
Klasse 1	<22		64,4
Klasse 2	22-34		123,1
Klasse 3a	>34	< 120	131,3
Klasse 3b	>34	≥ 120	131,3

LEFs der Klassen L1e bis L6e mit einer Geschwindigkeit von bis zu 45 km/h werden je nach Leistung in die Klassen 1 und 2 zugeordnet. Wie der Tabelle 1 in der Klasse 1 zu entnehmen ist, liegt die maximale Geschwindigkeit bei 64,4 km/h. Dies übersteigt die Höchstgeschwindigkeit von LEFs um fast 20 km/h. Die Klasse 2 hat sogar eine maximale Geschwindigkeit von 123,1 km/h. Demnach kann der neue WLTC, der aktuell eingeführt wurde, nicht aussagekräftig für LEFs angewendet werden. Zur Ermittlung des Verbrauchs und des CO₂-Austoßes, muss als erstes ein geeigneter Fahrzyklus entwickelt werden. Dieser im Verbund mit physikalischen Formeln, in denen alle Einflussfaktoren (z.B. Luftwiderstand) berücksichtigt werden, dient der realitätsnahen Energieverbrauch- und CO₂-Ermittlung. Um diese Faktoren zu identifizieren, müssen die physikalischen Grundlagen des Fahrens erklärt werden.

Physikalische Grundlagen

Zur Ermittlung des Leistungsbedarfes eines LEFs der Klassen L1e bis L6e mit einer Geschwindigkeit von bis zu 45 km/h, müssen wie auch bei jedem anderen Fahrzeug, die Gesamtenergien W ermittelt werden.

$$W = F_g * s \quad (1)$$

Dazu müssen bestimmte Fahrwiderstände berücksichtigt werden. In diesem Fall sind diese hauptsächlich der Beschleunigungs- F_{Be} , der Steigungs- F_S , der Luft- F_L und der Rollwiderstand F_R (Schütz 2016). Die Summe aller Widerstände wird als F_G bezeichnet.

$$F_G = F_{Be} + F_S + F_L + F_R \quad (2)$$

Der Beschleunigungswiderstand berücksichtigt die Trägheitskraft des Fahrzeuges, welche überwunden werden muss, sobald die Ist-Geschwindigkeit verändert wird. Sie setzt sich aus einem translatorischen und einem rotatorischen Anteil zusammen. Dabei wird die Gesamtmasse m_T des Fahrzeuges in die Leermasse m_N und die Zuladung m_Z zerlegt. Da die meisten LEFs keine Getriebe haben, wird der Massenfaktor e_i als Faktor 1,04 mit direktem Gang festgelegt (Heißing 2013). Für den Beschleunigungswiderstand gilt:

$$\begin{aligned} F_{Be} &= m_T * a + \sum_i J_i * \dot{\omega}_i = \\ &= (e_i * m_n + m_Z) * a = (1,04 * m_n + m_Z) * a \end{aligned} \quad (3)$$

Der Steigungswiderstand ist der Widerstand, der beim Befahren einer Steigung von Fahrzeugen überwunden werden muss. Bei dem Steigungswiderstand handelt es sich um keinen Widerstand im eigentlichen Sinne (Energiedissipation). Es erfolgt lediglich eine Umwandlung in potentielle Energie. Für den Motor ist es ein Widerstand, daher wird er auch so bezeichnet. Dieser Widerstand resultiert aus der am Fahrzeug wirkenden Hangabtriebskraft. Für die Steigungswiderstandskraft F_S gilt in Abhängigkeit des Steigungswinkels α .

$$F_S = m_T * g * \sin \alpha \quad (4)$$

Um einen Körper, in diesem Fall das LEF, im Medium Luft bewegen zu können, muss dieses verdrängt werden. Die Faktoren Fahr- bzw. Strömungsgeschwindigkeit und Dichte des Mediums müssen dabei berücksichtigt werden. Dabei ist ρ_A die Dichte des Strömungsmediums, V_V ist die Fahrgeschwindigkeit und V_W die Geschwindigkeit eines eventuell vorhandenen Gegenwinds.

Des Weiteren gehen die Fahrzeugstirnfläche A zusammen mit der aerodynamischen Güte des Körpers, der Luftwiderstandsbeiwert c_W , in die Ermittlung des Luftwiderstands ein. Für den Luftwiderstand F_L gilt:

$$F_L = c_W * A * \frac{\rho_A}{2} * (V_V - V_W)^2 \quad (5)$$

Beim Abrollen bewirkt die Drucklast des Fahrzeugs eine Verformung des Reifens und führt so zu einem Rollwiderstand F_R (A. Karle). Bei jeder Umdrehung federt das Rad ein und aus, so dass der Reifen relativ zur Fahrbahn abgleitet und einen Abrieb erzeugt. Dies wird im Rollwiderstandsbeiwert f berücksichtigt. Der Rollwiderstandsbeiwert ist abhängig von den Reifen und Oberflächen. Für die Kombination Stahlrad auf Stahlschiene beträgt er 0,001 bis 0,002, für Luftreifen bei kleiner Geschwindigkeit $< 80\text{km/h}$ auf festen Bodenbelägen, wie Beton, Asphalt und bei gewalztem Schotter zwischen 0,01 und 0,02, je nach Herstellerangaben. Auf einem Erdweg oder einem Ackerboden liegen die Werte bei 0,05 bis 0,35. Für den Rollwiderstand gilt:

$$F_R = f * m_T * g * \cos \alpha \quad (6)$$

Mit der Hilfe aller Fahrwiderstände, der Kapazität der Akkumulatoren und Wirkungsgrade wird die Reichweite ermittelt.

Aufnahme der Fahrprofile

Für die Berechnung der Reichweite wird ein Fahrzyklus benötigt. Dafür müssen mehrere Fahrprofile aufgenommen und anschließend ausgewertet werden. Für die Aufnahme solcher Fahrprofile wurde zunächst ein GPS-Datenlogger aus dem Modellbau verwendet. Die Fahrprofile wurden mit den LEFs der Hochschule Hannover (vgl. Abb. 1) aufgenommen. Die verbrauchte Energie des Fahrzeugs wird separat gemessen. Beim Laden wurde die benötigte Energie für die Akkumulatoren aufgenommen. Für eine höhere Genauigkeit und eine zeitsynchrone Sensormessung wurde die Messtechnik ausgetauscht. Es wurde ein Datenlogger mit dem Namen Cycle Analyst (s. Abb. 3) beschafft. Mit diesem GPS-Datenlogger werden nicht nur GPS-Daten, Geschwindigkeit über die Zeit aufgenommen, sondern auch Temperaturen (z.B. von den Batterien), aktuell benötigte Spannung und Strom, um einen genaueren Energieverbrauch berechnen zu können.

Durch diesem GPS-Datenlogger werden genauere Daten, als bei den ersten Versuchen mit dem Modellbau GPS-Datenlogger, ermittelt.



Abbildung 3: Cycle Analyst mit dem Datenlogger

Diese Variante zur Aufnahme der benötigten Daten wird zurzeit auf allen LEFs der Klassen L1e bis L6e mit einer Geschwindigkeit von bis zu 45 km/h der Hochschule Hannover aufgebaut und analysiert.

Entwicklung der Fahrzyklen

Um eine Reichweite und die Emission eines Fahrzeuges ermitteln zu können, wird konventionell ein Fahrzyklus verwendet. Für diesen wird ein Geschwindigkeit-Zeit-Profil benutzt (Proff 2013). Die Hochschule Hannover hat solche Fahrzyklen bereits 2015 für Pedelecs entwickelt (Bedrunka 2015). Dabei wurde die Methode, welche in der Automobilbranche benutzt wird, verwendet (Montazeri-Gh 2003). Ein Anwendungsbeispiel zu dieser Methode wird ebenfalls in (Amirjamshidi 2013) beschrieben. Analog zur Entwicklung der Fahrzyklen für Pedelecs wird mit der Software MATLAB eine Vielzahl von aufgezeichneten Geschwindigkeit-Zeit-Fahrprofile eingelesen und ausgewertet.

Nach der Fahrprofilaufnahme werden die Profile in Geschwindigkeitsbereiche, sogenannte Microtrips, aufgeteilt. Microtrips sind die gefahrenen Zeitbereiche zwischen zwei Zeitpunkten an den das Fahrzeug steht. Dieser Teil der Bewegung besteht aus Beschleunigung, Konstantfahrt und Bremsung. Eine Standphase ist am Anfang und am Ende eines Microtrips. Aufgeteilt werden die Daten in zwei Anteile. Die Basisteile umfassen die Geschwindigkeit-Zeit-Profile und der zweite Teil enthält die Häufigkeit des Stands in Prozenten.

Da der Verkehr in der Stadt sehr stark variiert, wie zum Beispiel stauender Verkehr (z. B. Rushhour), längere Strecke ohne Ampeln (z. B. am späten Abend bei der Grünphase) oder normaler Stadtverkehr, müssen Microtrip-Bereiche klassifiziert werden. In jedem Bereich werden die Durchschnittsgeschwindigkeit und der Prozentsatz der Leerlaufzeit ermittelt. Dadurch werden wie auch beim NEDC und dem WLTC in die Geschwindigkeitsbereiche aufgeteilt. In diesem Fall sind es drei Verkehrsbereiche, die in der Tabelle 2 abgebildet sind.

Tabelle 2: Klassifizierung von Geschwindigkeitsbereichen

	$V_{average}$ [km/h]	<i>Idle time</i> [%]
Sehr langsam	≤ 15	0-100
Urban	15-30	<60
Schnell	>30	<24

Sehr langsamer Stadtverkehr ist typisch für zentrale Geschäftsbezirke, Zonen mit Schrittgeschwindigkeit, Rushhour mit sehr häufigen Starts und Stopps. Der sehr langsame Bereich verläuft mit einer durchschnittlicheren Geschwindigkeit von weniger als 15 km/h und besitzt sehr viel Leerlaufzeit. Der urbane Verkehr mit gemäßigter Leerlaufzeit beinhaltet eine Durchschnittsgeschwindigkeit zwischen 15 km/h und 30 km/h. Die maximal erlaubte Geschwindigkeit in der Stadt wird in dem schnellen Stadtverkehr mit fließenden Fahrten und sehr wenigen Leerlaufzeiten erreicht. Die durchschnittliche Geschwindigkeit ist hierbei grösser als 30 km/h. Folgend wird die Dauer einzelner Klassifizierungsbereiche bestimmt.

$$t_i = \frac{t_{drivecycle}}{t_{Overall}} * \sum_{j=1}^{n_j} t_{i,j} \quad (7)$$

Die Dauer t_i einzelner Kategorien mit den Nummern i ($i = 1, 2, 3$) befindet sich in einem Fahrzyklus. In dem endgültigen Fahrzyklus ist die Dauer als $t_{drivecycle}$ bezeichnet und kann selbst bestimmt werden. Als $t_{Overall}$ wird die Dauer aller aufgenommen Daten dargestellt. Die Zeit $t_{i,j}$ ist die Zeit für jeweiligen Microtrip.

Die Gesamtdauer des Fahrzyklus soll wie der WLTC ca. 20 min betragen, damit es noch wirtschaftlich ist, den Fahrzyklus auf einem Rollenprüfstand abzufahren und dennoch eine repräsentative Fahrsituation liefern zu können.

Für einen endgültigen Fahrzyklus werden repräsentative Microtrips ausgewählt. Ein geeigneter Microtrip ist der mit minimalem Unterschied zwischen den Parametern und jenen der Gesamtdaten in einer bestimmten Klassifizierungskategorie. Daraus resultieren folgende Formeln mit der Durchschnittsgeschwindigkeit $\bar{V}_{dmt,i}$ und der Standzeit $idtime_{mt,i}$ in Prozent von einem Microtrip:

$$\bar{V}_{rel,i} = \frac{\bar{V}_{dmt,i}}{\bar{V}_{total}} \quad (8)$$

$$idtime_{rel,i} = \frac{idtime_{mt,i}}{idtime_{total}} \quad (9)$$

Ein perfekter Microtrip hat einen relativen Parameter gleich 1, was es selten gibt. Deswegen wird eine neue Anzeige N_i , für jeden Microtrip definiert:

$$N_i = |\bar{v}_{rel,i} - 1| + |idtime_{rel,i} - 1| \quad (10)$$

Die neue Anzeige N_i ist der Indikator der Nummer i . Es werden die Microtrips aus allen aufgenommenen Daten ausgewertet. Nur die Microtrips werden ausgewählt, die einen minimalen Indikator N_i besitzen. Mit Einsatz der Formeln 7-10 wird ein Fahrzyklus für LEFs der Hochschule Hannover (vgl. Abbildung 4) entwickelt. Die benötigte Datenbank von Fahrprofilen wurde jeweils mit gleichen Fahrzeugen aufgenommen.

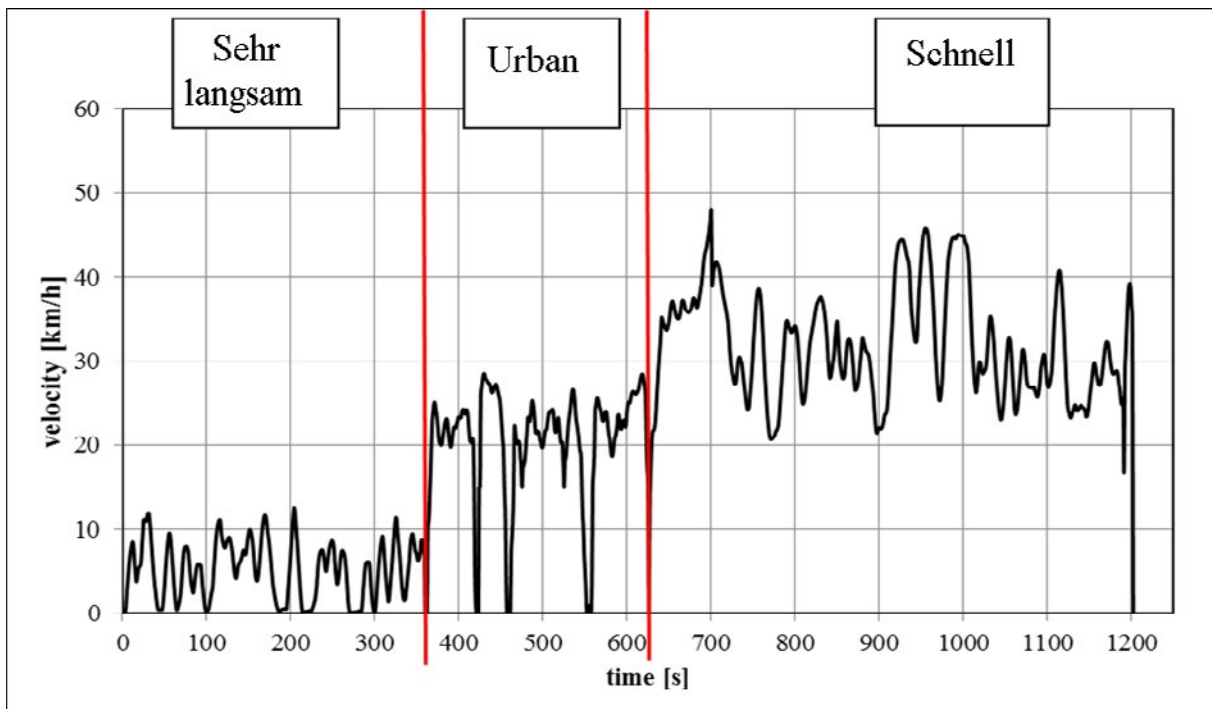
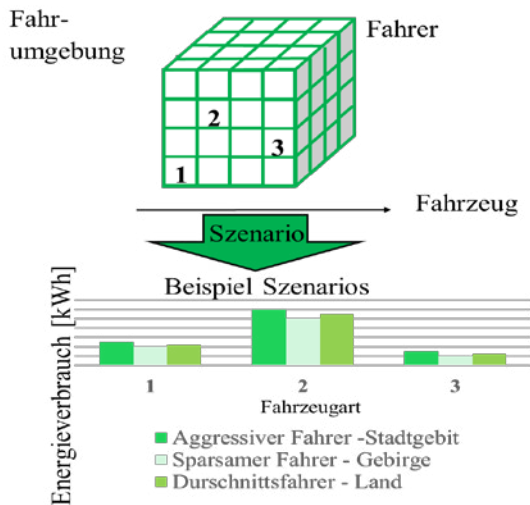


Abbildung 4: Eigenentwickelter Fahrzyklus für LEFs der Hochschule Hannover

Definierung der Szenarien

Als erstes werden die Einflussfaktoren die auf die Reichweite von LEFs wirken definiert, wie die Fahrzeugart, die Umgebung, die Fahrergruppen und die Fahrsituation. Mit Hilfe dieser verschiedenen Einflussfaktoren werden die bestimmten Einsatzszenarien entwickelt. Für diese Zwecke wird die 3F-Methodik, die in (Kücükay 2011) beschrieben ist, verwendet.

Die 3F-Methode wurde schon an der Hochschule Hannover für Pedelecs angewendet. Analog dazu wird diese Methode auf die LEFs übertragen (Abbildung 5).



Mit der 3F-Methode werden alle wichtigen Einflussfaktoren klassifiziert. Diese Klassifizierung erleichtert die Erstellung von Anwendungsszenarien. Dadurch können die Kunden die Fahrzeuge nach eigenen Wünschen auswählen. Andersrum können die Hersteller die Fahrzeuge besser an die Kundenwünsche anpassen und somit die einzelnen Fahrzeugkomponenten nach den Kundenanforderungen auslegen.

Abbildung 5: 3F-Parameterraum

Die Tabelle 3 zeigt die wichtigsten Einflussfaktoren, die in Fahrumgebung, Fahrer und Fahrzeug, aufgeteilt sind.

Tabelle 3: wichtigsten Einflussfaktoren beim Fahren

	Einflussfaktoren
Fahrumgebung	Innenstadt / Ampel, rush hour
	Innenstadt / Nachtverkehr
	Land / Konstante Fahrt
	Gebirge / Höhenprofil
	Reibwert, Seiten- / Gegenwind
	Außentemperatur
Fahrer	Gewicht
	Gewünschte Geschwindigkeit
	Fahrstil / Beschleunigung
	Stirnfläche beim Roller
	Fahrposition beim Roller
Fahrzeug	Gewicht, Stirnfläche, Antriebsart
	Mechanischer Wirkungsgrad
	Elektrischer Wirkungsgrad
	Batteriekapazität
	Felgengröße, Reifengröße
	Motortyp, Motorposition)

Um alle Anwendungsszenarien zu definieren, müssen sehr viele Fahrprofile mit spezifischen Daten (z.B. Kundenparameter) aufgenommen werden.

Entwicklung von Simulationsmodellen und Prüfständen

Nach der Fahrzyklusentwicklung und Szenariendefinierung müssen die Fahrten simuliert werden, um den Verbrauch und die CO₂-Emission zu ermittelt. Mit Hilfe der physikalischen Grundlagen (Formeln 1-6) wird ein MATLAB/Simulink Modell entwickelt. Ebenfalls werden zum Vergleich der Ergebnisse alle Fahrzeugdaten in die IPG Software Carmaker/Motorcyclemaker eingepflegt, die Simulationparameter ergänzt und die Ergebnisse validiert.

Um die Daten besser verifizieren zu können, wurde ein Rollen-Rollerprüfstand (Abbildung 6) für Elektroroller bzw. Elektrotretroller entwickelt und aufgebaut. Vor kurzem wurde der Prüfstand für Elektro-Microautos erweitert.



Abbildung 6: Rollen-Prüfstand der Hochschule Hannover

Ableitung sinnvoller Kenngrößen

Im Folgenden werden erste Ergebnisse der Simulationen und der Realfahrt von einem Elektroroller (siehe Abbildung 7) dargestellt. Die Simulationsmodelle wurden so verifiziert, dass die Ergebnisse fast identisch ausfallen. Die gleichen Methoden zur Verbrauch und CO₂-Emission Ermittlung für die anderen LEFs werden in den nächsten Monaten durchgeführt. Deswegen werden die Schwerpunkte auf die Ermittlung der Reichweite und der CO₂-Emissionen von Elektrorollern gelegt. Die CO₂-Emissionen werden für einen Energieverbrauch mit Hilfe eines Strommixfaktors von 0,535 kgCO₂/kWh (Icha 2016) ermittelt. Zur besseren Vergleichbarkeit wird der Benzinverbrauch in Litern in Kilowattstunden umgerechnet. Ein Liter Benzin entspricht dabei 8,77 Kilowattstunden (Kuchling 2014).

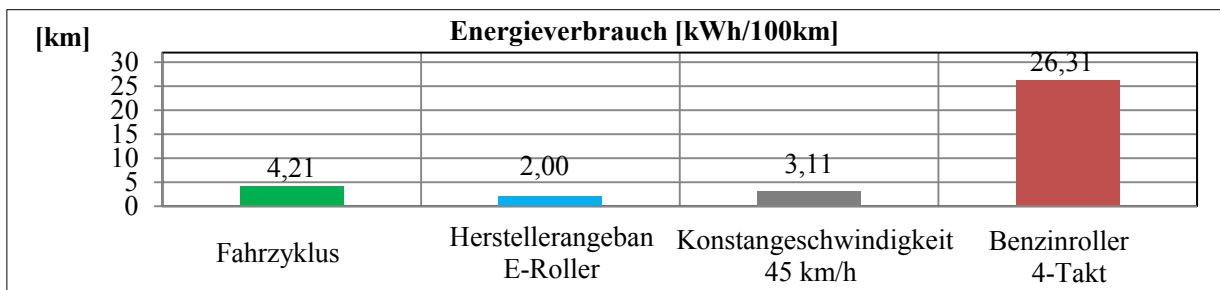


Abbildung 7: Energieverbrauch im Vergleich

Der Verbrauch mit dem eigenentwickelten Fahrzyklus von 4,21 kWh/100 km übersteigt die Herstellerangaben um das 2,1-fache. Der Unterschied zu der maximalen Konstant-Geschwindigkeit ist nicht so groß und beträgt das 1,4-fache von den Herstellerangaben. Die Angaben von dem Benzinroller sind nur zum Vergleich dargestellt worden.

Somit erreicht ein durchschnittlicher Elektroroller mit 1,2 kWh Batteriekapazität nur knapp 29km, anstatt den vom Hersteller angegeben 60km. Der Hauptgrund warum die Reichweiten bei der konstanten Geschwindigkeit und bei den Herstellerangaben so viel grösser sind als bei dem entwickelten Fahrzyklen, ist die fehlende Beschleunigungsenergie. Die Beschleunigungsenergie fehlt bei der Konstantfahrt komplett. In der Abbildung 8 ist die Übersicht der Reichweiten dargestellt.

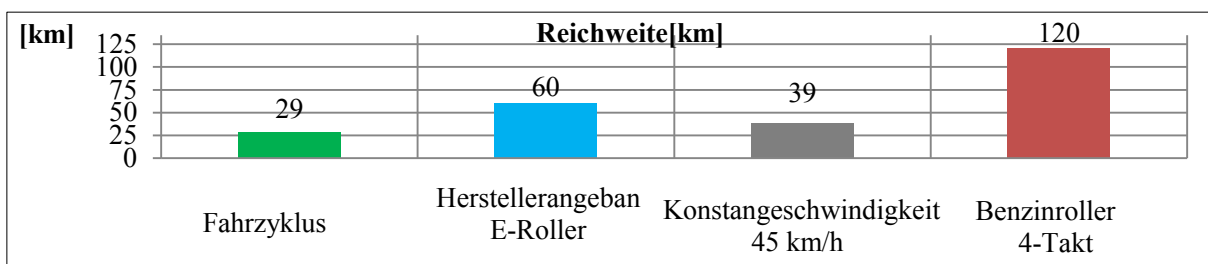


Abbildung 8: Reichweite

Dabei entstehen bei der Umrechnung mit dem deutschen Strommixfaktor folgenden CO₂-Emissionen (Abbildung 9).

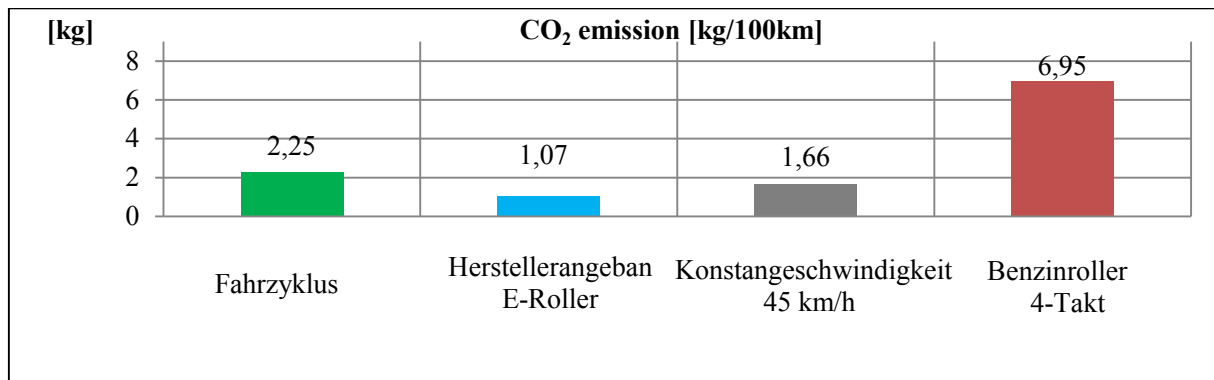


Abbildung 9: CO₂-Emissionen

Wie auch bei den Verbräuchen sind hier sehr große Abweichungen zwischen dem eigenentwickelten Fahrzyklus und den Herstellerangaben zu erkennen. Dies liegt daran, dass es keine genormten Verfahren bzw. Methoden für die Verbrauchs und CO₂-Emissions Ermittlung bei LEFs gibt.

Abbildung 10 zeigt ebenfalls, dass unter Berücksichtigung der verschiedenen Einflussfaktoren bzw. Fahrweisen mit dem Roller die Reichweite deutlich unter den Herstellerangaben liegt.

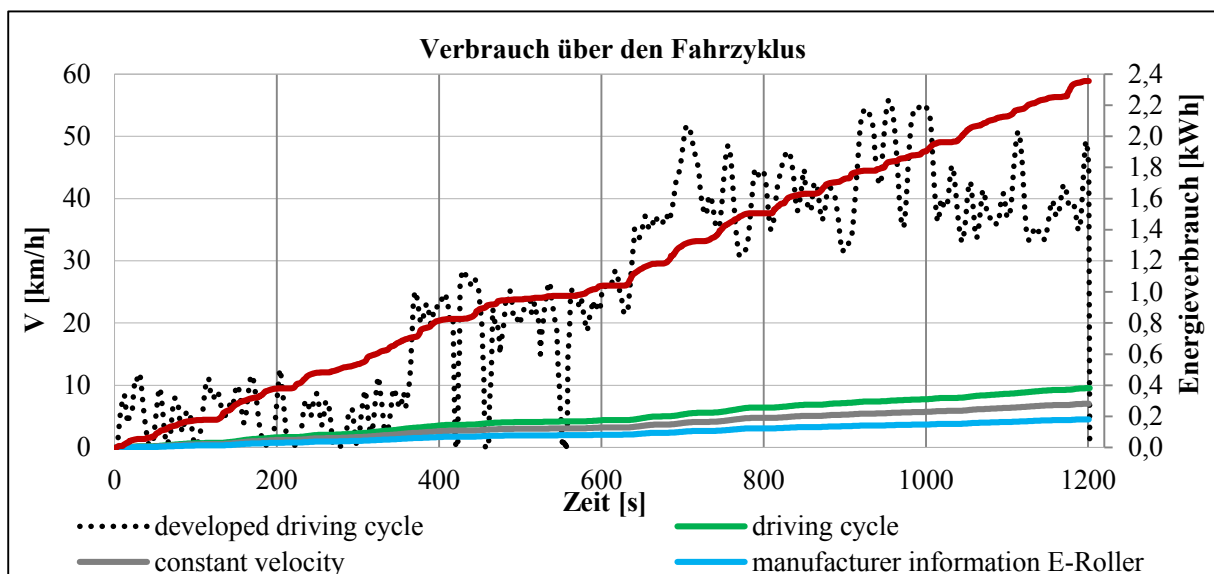


Abbildung 10: Verbrauch über den Fahrzyklus

Die Angaben der Hersteller werden unter perfekten Voraussetzungen und nicht wie in diesem Fall unter üblichen Umgebungsfaktoren ermittelt. Dadurch steigen die CO₂-Gesamtemissionen im reinen Stadtzyklus im Vergleich zu den Herstellerangaben drastisch. Die CO₂-Emissionen der Benzinroller ist um das Vierfache höher als die hier ermittelten CO₂- Ausstoße der Elektroroller.

Zusammenfassung und Ausblick

LEFs spielen eine wichtige Rolle in der Elektromobilität. Bei vielen Modellen handelt es sich um Kleinserien, bei denen entscheidende Punkte, wie passive Sicherheit und aktive sicherheitsrelevante Systeme, wie z.B. ABS, nicht eingebaut werden, um so den Energieverbrauch zu reduzieren. Des Weiteren erreichen diese deutlich kleinere Reichweiten und müssen deutlich länger geladen werden, als die Hersteller angeben. Weiterhin zeigen diese eine schlechte Bedienbarkeit und eine eingeschränkte Nutzbarkeit auf.

Die im Rahmen der Arbeit erstellten Simulations-Modelle in MATLAB/Simulink und in MotorcycleMaker berechnen basierend auf den selbst entwickelten Fahrzyklen und den Fahrzeugdaten CO₂-Emissionen, Energieverbräuche, sowie Batterieladestände. Die Auswertung zeigt deutlich den Unterschied der Fahrstreckencharakteristik der betrachteten Fahrsituationen. Der ermittelte Energiebedarf und somit auch die Reichweite der betrachteten Elektroroller hängen im Wesentlichen vom Profil der Fahrstrecke, den fahrzeugspezifischen Parametern wie Gewicht und Widerstandsbeiwerte sowie dem Fahrverhalten ab. Die Ergebnisse der Real- und der Rollen-Prüfstands-Fahrten bestätigen diese Aussage, dass die Reichweitenangaben der Hersteller und die damit verbundenen CO₂-Emissionen nicht den realen Ergebnissen entsprechen. Abbildung 11 zeigt in einer Übersicht das Verfahren der Hochschule Hannover für die Entwicklung von Fahrzyklen und anschließender Verbrauchs bzw. CO₂-Emissions Ermittlung, das an der Hochschule Hannover für LEFs angewendet wird.

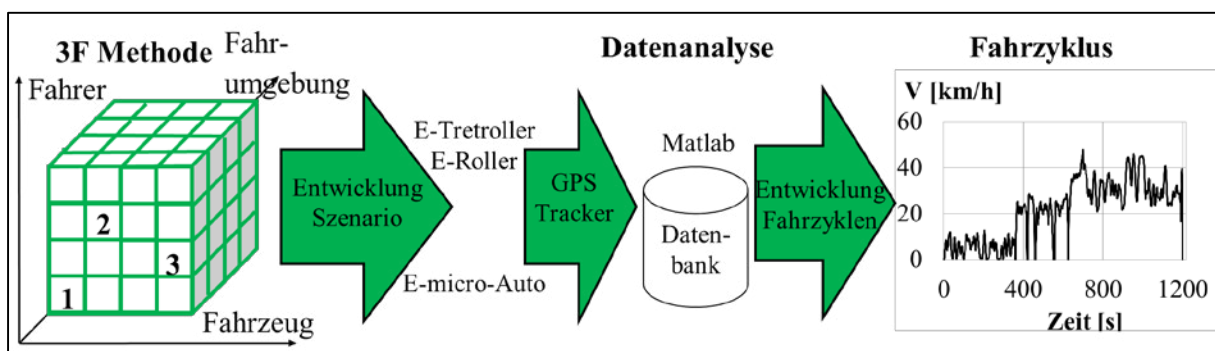


Abbildung 11: Verfahren der Hochschule Hannover für die Entwicklung von Fahrzyklen

Literaturverzeichnis

A. Bedrunka, L.-O. Gusig, Multidimensional Parameter Space for an Individual Prediction of the Range in the Field of Pedelecs, ISBN 9781784661588, Valencia, Wessex Institute of Technology, 2015

A. Karle, Elektromobilität Grundlagen und Praxis, B. Heißing, Fahrwerkhandbuch: Grundlagen, Fahrdynamik, Komponenten, Systeme, Mechatronik, Perspektiven, ISBN 978-3-658-01992-1, Wiesbaden, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013

BEM-Initiative: 1.000 Elektroroller für Deutschland, <http://www.bem-ev.de/bem-initiative-1-000-elektroroller-fur-deutschland-2>, 2016

Elektroroller Test 2018, E-Scooter im Vergleich, <http://www.sport-und-abenteuer.de/Elektroroller-Test-E-Scooter>

F. Küçükay, T. Kassel, M. Eghtessad, H. Kollmer, Requirement Engineering Using the 3D Method, SAE Technical Paper, Braunschweig, 2011.

G. Amirjamshidi, M. J. Roorda, Development of Simulated Driving Cycles, Toronto, Transportation Research Board Business Office, 2013

H. Ankenbrand, China sagt Elektrorollern den Kampf, Schanghai, Frankfurter allgemeiner Zeitung, 2016

H. Proff, W. Pascha, J. Schönharting, D. Schramm, Schritte in die künftige Mobilität: technische und betriebswirtschaftliche Aspekte, ISBN 978-3-8349-4308-8, Wiesbaden, Springer Gabler, 2013 ISBN 978-3-446-44339-6, München, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2015

J. Liebl, M. Lederer, K. Rohde-Brandenburger, J. Biermann, M. Roth, H. Schäfer, Energiemanagement im Kraftfahrzeug: Optimierung von CO₂-Emissionen und Verbrauch konventioneller und elektrifizierter Automobile, ISBN 978-3-658-04451-0 Wiesbaden, Springer Vieweg, 2014
Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), Zuwachs KFZ-Bestände 2013-2018,
https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Ueberblick/2018_b_ueberblick_pdf

Nationale Plattform Elektromobilität (NPE), Fortschrittsbericht der Nationalen Plattform Elektromobilität (Dritter Bericht), Berlin, Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (GGEMO), 2012

M. Montazeri-Gh and M. Naghizadeh, Development of car drive cycle for simulation of emissions and fuel economy, ISBN 3-936150-28-1, Tehran, Simulation in Industry, 15th European Simulation Symposium, 2003

P. Icha, G. Kuhs, Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2015, ISSN 1862-4359, Dessau-Roßlau, Umweltbundesamt, 2016

R. Schurig, StVO - Kommentar zur Straßenverkehrs-Ordnung mit VwV-StVO, ISBN 978-3-7812-1945-8, Berlin, Kirschbaum Verlag, 2017

T. Schütz, Fahrzeugaerodynamik: Basiswissen für das Studium, ISBN 978-3-658-12818-0, Wiesbaden, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016

G. Amirjamshidi, M. J. Roorda, Development of Simulated Driving Cycles, Toronto, Transportation Research Board Business Office, 2013

F. Küçükay, T. Kassel, M. Eghtessad, H. Kollmer, Requirement Engineering Using the 3D Method, SAE Technical Paper, Braunschweig, 2011.

Portables Mikro-BHKW zur Anwendung im Gebäude und im Elektrofahrzeug: Grundlegende Leistungsdaten und Designprozess

Hanif, Haider Iqbal; Rüscher, Henrik; Cartier, Philipp; Gusig, Lars-Oliver

Einleitung

Die Bundesrepublik Deutschland soll zum Leitmarkt für Elektromobilität werden. Aktuell werden vor allem Ladeinfrastruktur, regenerative Stromerzeugung und Reichweite von Elektrofahrzeugen diskutiert. Reine Elektrofahrzeuge konnten sich allerdings bisher nicht im deutschen Automobilmarkt durchsetzen, da hierzu noch die Kundenakzeptanz fehlt. Ursachen hierfür sind u. a. die unzureichende Ladeinfrastruktur, die geringe Reichweite und die damit verbundene Angst vor dem Liegenbleiben infolge einer leeren Batterie.

Im Rahmen des Forschungsschwerpunktes „Skalierbarkeit mobiler Mikro-BHKWs“ werden an der Hochschule Hannover im Institut für Konstruktionselemente, Mechatronik und Elektromobilität technische Möglichkeiten zur Skalierung von mobilen Mikro-Blockheizkraftwerken (mmBHKW) untersucht. Dieser Forschungsschwerpunkt wird aus Mitteln aus dem Niedersächsischen Vorab der VolkswagenStiftung finanziert, welche über das Niedersächsische Ministerium für Wissenschaft und Kultur ausgeschrieben wurde. Zu den industriellen Kooperationspartnern gehören die IAV GmbH aus dem Bereich Automotive Engineering, die enercity Contracting GmbH aus dem Bereich Energieversorgung und Contracting und die Kraftwerk Kraft-Wärme-Kopplung GmbH als BHKW-Hersteller. Die folgende Abbildung stellt die zu Beginn des Projektes untersuchte „Power Conditioning Unit“, ein Konzept der IAV GmbH.

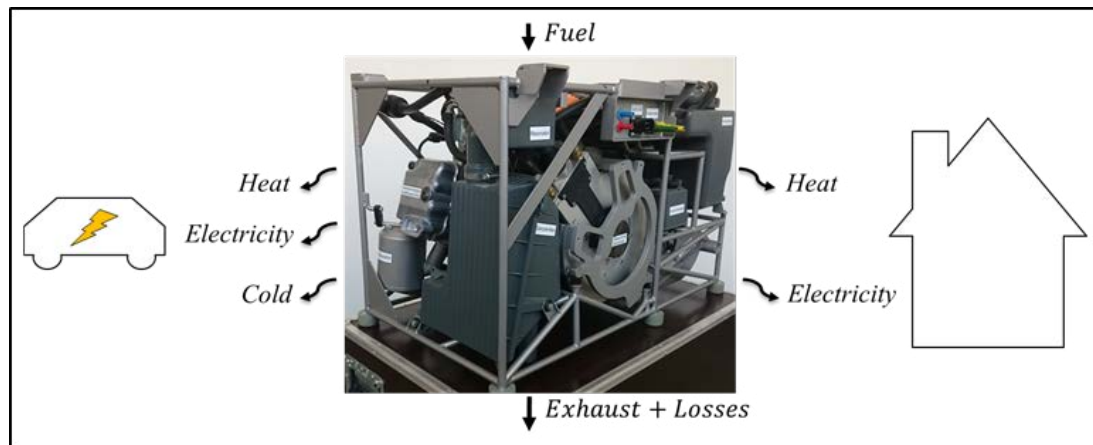


Abbildung 1: Mobile Power Conditioning Unit (PCU)
Quelle: Blank 2010; Bas 2011; Hanif et al. 2017

Im Rahmen dieses Forschungsschwerpunktes ist u. a. ein Konzept für ein portables Mikro-Blockheizkraftwerk (pmBHKW) entwickelt. Dieses Konzept erzeugt über das Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) thermische und elektrische Energie und soll diese im portablen Einsatz in Elektrofahrzeugen und Gebäuden bereitstellen. Es wurde hinsichtlich der Nutzung, Baugröße und Leistungsfähigkeit analysiert und auf seine technische Umsetzbarkeit untersucht.

Im Elektrofahrzeug fungiert das pmBHKW als verbrennungsmotorischer Range Extender (RE) mit KWK zur Bereitstellung von thermischer Energie für die Konditionierung der Traktions-Hochvolt-Batterie und des Fahrgastraumes. Des Weiteren erfolgt die Erzeugung von elektrischer Energie für das Laden der Batterie, wodurch sich eine Erhöhung der Gesamtreichweite ergibt. Durch die Nutzung der vom Motor abgegebenen Wärme kann das Thermomanagement des Fahrzeugs profitieren und der Wirkungsgrad des Gesamtsystems erhöht werden. Dies grenzt sich von üblichen RE-Konzepten dadurch ab, dass die Hauptaufgabe der Einheit nicht auf der Erzeugung von Ladestrom, sondern auf der Bereitstellung von Wärme liegt. Die daraus abgeleiteten Betriebsstrategien können über eine Steigerung der Energieeffizienz und des Komforts einen Beitrag zur Ressourcenschonung leisten. Im Gebäude fungiert das pmBHKW als temporär stationäres BHKW zur dezentralen Energieerzeugung. Ähnlich wie im Elektrofahrzeug erfolgt über den KWK-Effekt und die Einbindung in das Gebäudemanagement die Bereitstellung von thermischer Energie für die Heizung und Warmwasserbereitstellung und von elektrischer Energie für die elektrischen Verbraucher.

Parallel zu den messtechnischen und konstruktiven Arbeiten ist in Kooperation mit der Fakultät III – Medien, Information und Design an der Hochschule Hannover ein Designkonzept für das Gehäuse des pmBHKWs entwickelt worden.

Vorstellung – pmBHKW

Das pmBHKW bietet gegenüber herkömmlichen stationären BHKWs (im Gebäude) Vorteile durch die Doppelanwendung im Elektrofahrzeug sowie im Gebäude einerseits und einen portablen Einsatz andererseits, s. folgende Abbildung 2. Somit bietet das pmBHKW die Funktion eines Range Extenders durch die zusätzliche Reichweite infolge der Aufladung einer Fahrzeugbatterie im Elektrofahrzeug und des stationären BHKWs durch die Versorgung mit Wärme und Strom im Gebäude.

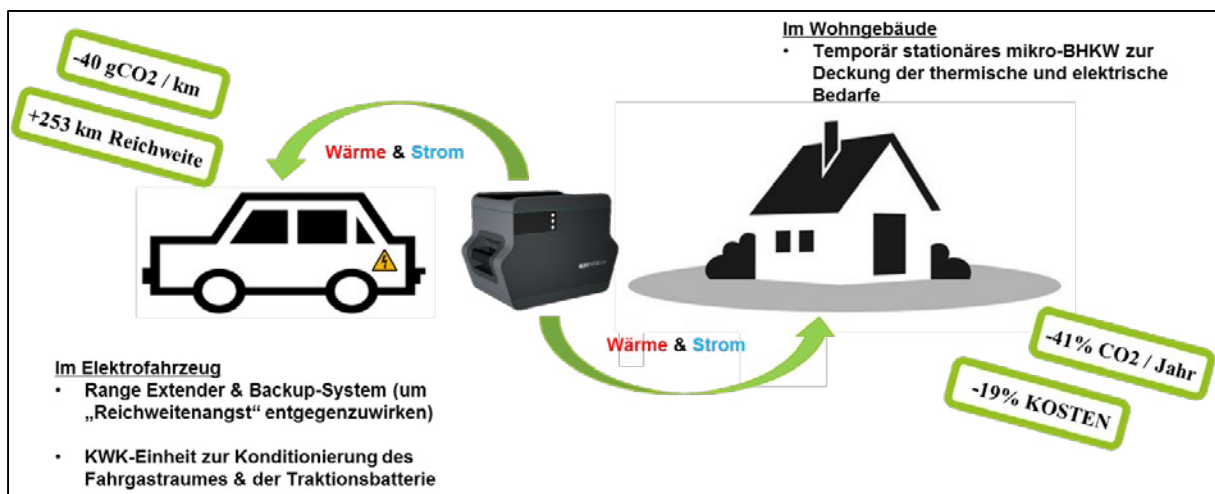


Abbildung 2: Vorteil durch Kraft-Wärme-Kopplung im Elektrofahrzeug und Gebäude

Im Vergleich zum Strommix-Deutschland bietet der Einsatz bis zu 40 gCO₂/km reduzierte Emissionen sowie 253 km Zusatzreichweite im Elektrofahrzeug (VW e-Golf) und bis zu 41 gCO₂/km reduzierte Emissionen sowie bis 19 % Einsparung bei den Betriebskosten (durch die Kombination aus Gas- und Strombezugskosten) im Gebäude.

Folgende Abbildung 3 verdeutlicht, dass das pmBHKW in der Leistungsklasse die thermischen Bedarfe von einem Elektrofahrzeug (VW e-Golf) und gleichzeitig die eines Gebäudes (Einfamilienhaus mit 4 Personen im Haushalt) decken kann. Das pmBHKW erlaubt außerdem eine Deckung des elektrischen Bedarfs bis zu 86 % im Gebäude und im Elektrofahrzeug.

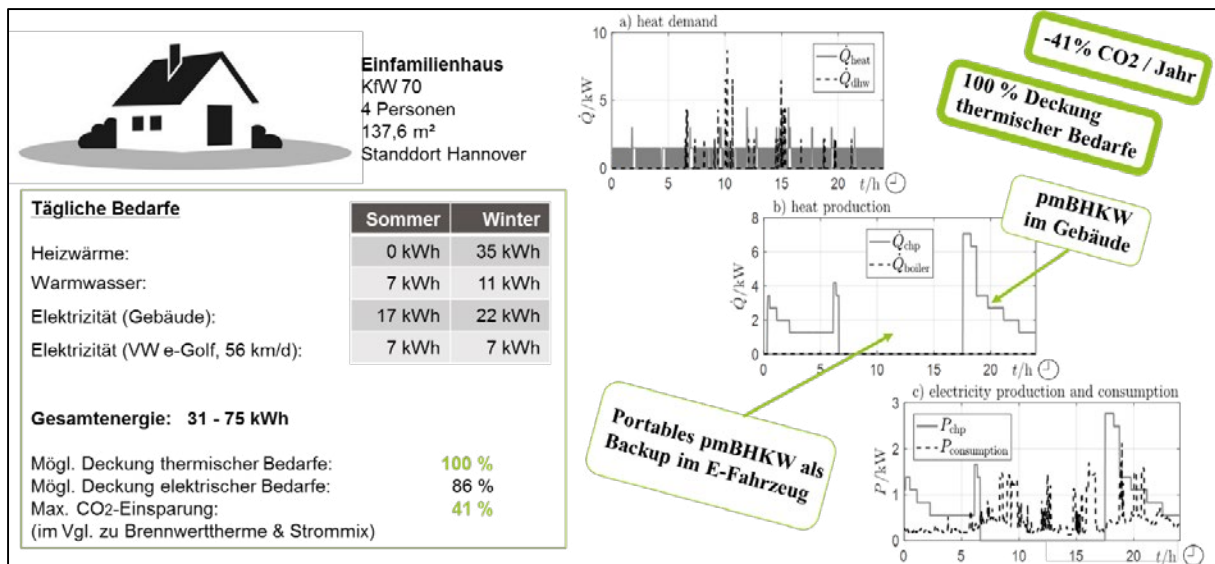


Abbildung 3: Ein portables pmBHKW versorgt gleichzeitig das Elektrofahrzeug und das Gebäude

Das pmBHKW kann bei der Doppelnutzung im Gebäude in der Modellrechnung bis zu 13 h genutzt und damit das Gebäude und Elektrofahrzeug mit Strom und Wärme versorgen.

Anwendung – pmBHKW

Folgende Abbildung 4 stellt den Vergleich zwischen dem pmBHKW und den Systemen am Stand der Technik, wie bspw. Stromerzeuger und stationäres BHKW, dar. Erkennbar ist, dass das pmBHKW bzgl. der Energiedichte wesentlich leistungsfähiger ist. Dieser Unterschied entsteht dadurch, dass der Prototyp für das portable mBHKW gewicht- und bauraumtechnisch optimiert wurde. Die Systeme aus dem Stand der Technik aus anderen Anwendungsfeldern sind aus Kostengründen höhere Gewichte und größere Bauräume oft tolerierbar.

Für die Ergebnisse in den Abbildungen 4 und 5 wird von folgendem Szenario ausgegangen:

- Wintertag: -5 °C
- Einfamilienhaus: KfW Effizienzhaus 70 (Bestandsimmobilie) in Hannover
- Bewohneranzahl: 4 Personen
- Grundfläche: 137,6m²
- Erforderliche Heizenergie: 46kWh (Warmwasser + Heizwärme)
- Erforderliche elektrische Energie: 22kWh
- Fahrzeug: VW e-Golf
- Verbrauch: 12,7kWh/100km

- Durchschnittliche Geschwindigkeit: 50km/h
- Erforderliche Heizenergie: 12kWh/100km
- Erforderliche Reichweite: 56 km/Tag
- Energiewandler während der Fahrt: Im Betrieb

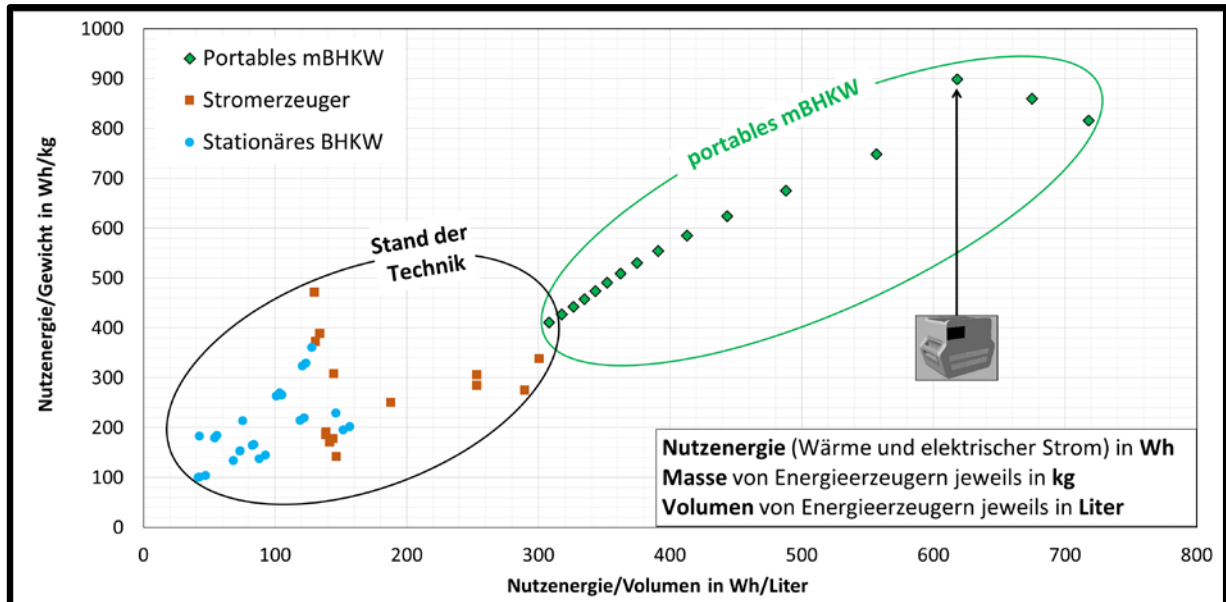


Abbildung 4: Ein portables mBHKW hat eine deutlich größere Energiedichte als andere Energiewandler

In Abbildung 5 werden außerdem ein Range Extender eines BMW i3 und eine Lithium-Ionen-Batterie im Stand der Technik berücksichtigt. Dabei ist erkennbar, dass das pmBHKW bzgl. der Energiedichte um 13 % im Vergleich zu Stromerzeugern, 24 % im Vergleich zum stationären BHKW, 45 % im Vergleich zum Range Extender im BMW i3 und bis zu 80 % im Vergleich zur Lithium-Ionen-Batterie einen Gewichtsvorteil bietet. Ein wesentlicher Unterschied ist, dass das pmBHKW tragbar und sowohl im Elektrofahrzeug als auch im Gebäude einsetzbar ist. Diese Möglichkeit zur Doppelnutzung ist bei den Systemen aus dem Stand der Technik nicht gegeben.

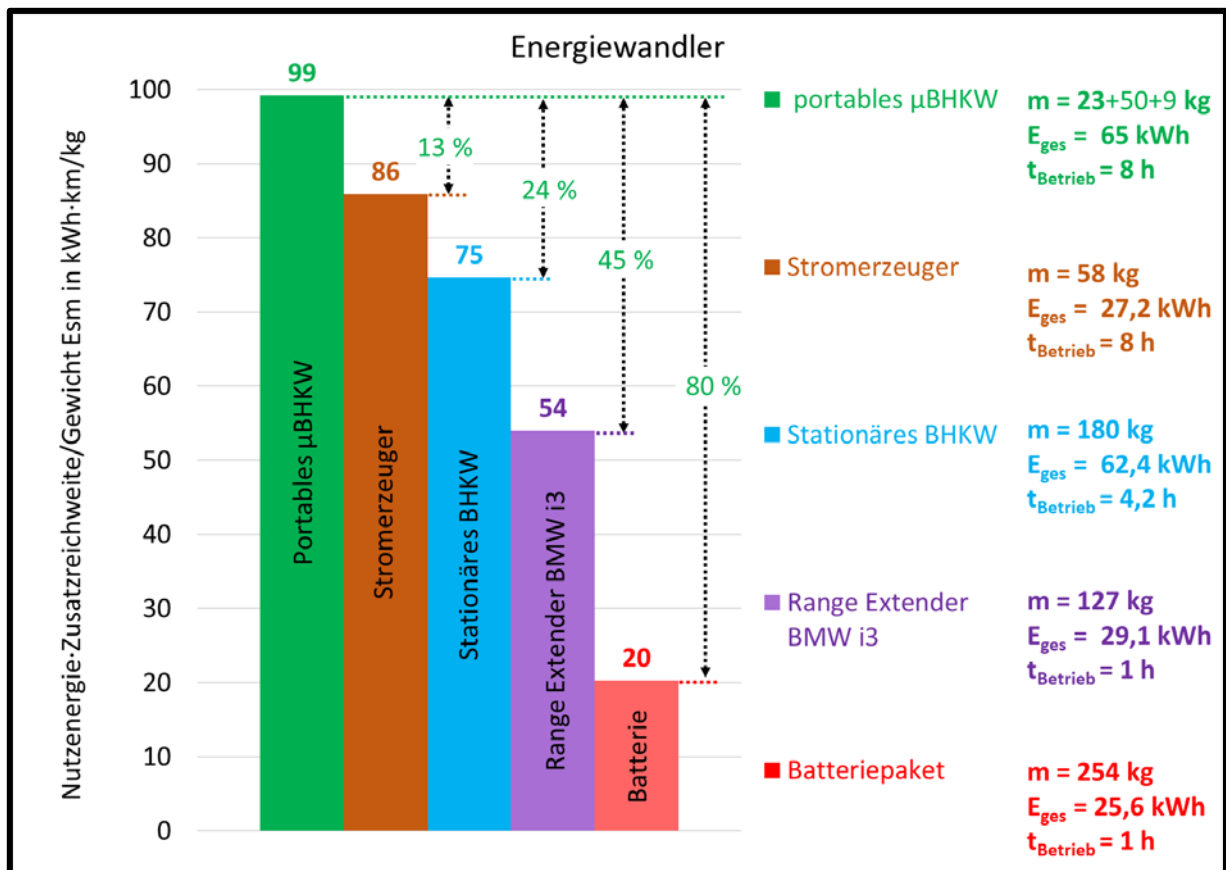


Abbildung 5: Vergleich verschiedener Energiewandler

Vom Package zum Design

Zur Design-Entwicklung wird das pmBHKW-Package bestehend aus dem Verbrennungsmotor und dem Generator sowie weiteren Peripheriebauteilen, wie dem Abgasstrang einschließlich des Katalysators vorgegeben. Mit den Informationen über die Schnittstellen zum Elektrofahrzeug und zum Gebäude kann das Gehäusedesign unter Beachtung verschiedener Aspekte, wie bspw. Ergonomie, Innovation und Bedienung, durch einen Designer entwickelt werden. Die Herausforderung bei der Gestaltung besteht besonders darin, dass das mBHKW portabel bzw. tragbar sein muss.

Am Anfang eines technischen Entwicklungsprozesses steht ein Problem, dass durch einen Nutzer definiert wird. Dessen Probleme werden möglichst präzise und messbar formuliert. Neben technischen Größen ist insbesondere auch die Kommunikation von Kunde, Designer und Ingenieur relevant.

Nach ersten Gesprächen ging es darum, ein Design für den ersten Prototyp zu entwerfen, vgl. folgende Abbildung.

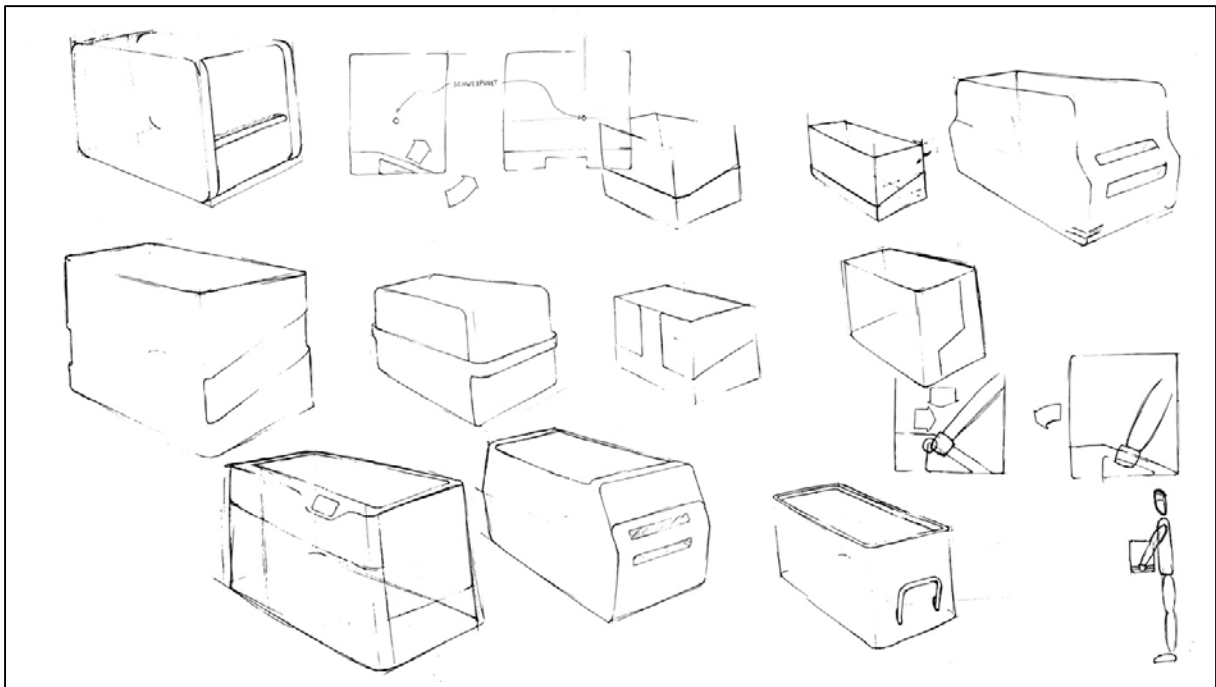


Abbildung 6: Skizzen im Designprozess

Für die Gestaltung sind Überlegungen zum Use-Case relevant: Wie agiert der User mit dem Gerät? Bewegt er das BHKW täglich, wöchentlich, monatlich? Trägt er es alleine oder zu zweit? Wird es zwischendurch abgestellt? Wie passt das Gerät in das Fahrzeug? Wie wird es dort befestigt?

Um auf diese und weitere Fragen die Antworten zu finden, durchläuft das Design einen Entwicklungsprozess, in dem Studien zum Thema Ergonomie, Passform, Bedienung und Ästhetik angestellt werden, vgl. folgende Abbildung 7. Ein Beispiel dafür sind Griffstudien, in denen anhand eines physischen Modells verschiedene Griffhöhen, -weiten, -winkel und -formen getestet werden. Wichtig ist, ob das Gerät alleine, zu zweit oder mit mehreren Personen getragen wird.



Abbildung 7: Implementierung des pmBHKWs in das VW e-Golf

Neben dem Nutzungsbild geht es auch um das Erscheinungsbild. Welcher Ästhetik soll das Gerät folgen? Wie soll es auf den Nutzer wirken? Wie integriert es sich in das bestehende Design im Auto? Welche Assoziationen soll das Design auslösen?

Hier besteht der Entwicklungsprozess meist in der raschen Folge von immer neuen Skizzen und praktischen Versuchen. Es muss eine Formsprache gefunden werden, die der Aussage des Produktes und dem Entwickler entspricht. Im Fall des pmBHKWs sollte eine robuste und technische Formsprache gefunden werden, die aber ihre Portabilität behält. Ein Produkt, dem man seinen technischen Fortschritt ansieht, das aber nicht „optisch aus dem Kofferraum springt“.

Umgesetzt wurden diese Assoziationen durch einen umlaufenden Mantel, der den Kern, in dem das Gerät steckt, schützt und trotzdem zugänglich macht. Die Farben sind bedeckt gehalten, damit sich das Produkt gut in das bestehende Design eines verfügbaren Fahrzeugs (VW e-Golf), insbesondere den Kofferraum, integriert. Eine grüne Akzentlinie am Korpus signalisiert im Gesamtkonzept des sehr technischen Produkts Image-Statements wie „Nachhaltigkeit“ und „Innovation“.

Folgende Abbildung 8 stellt einen Einsatz des pmBHKW einschließlich von Zusatzbauteilen des Wärmekreislaufs im Elektrofahrzeug dar.

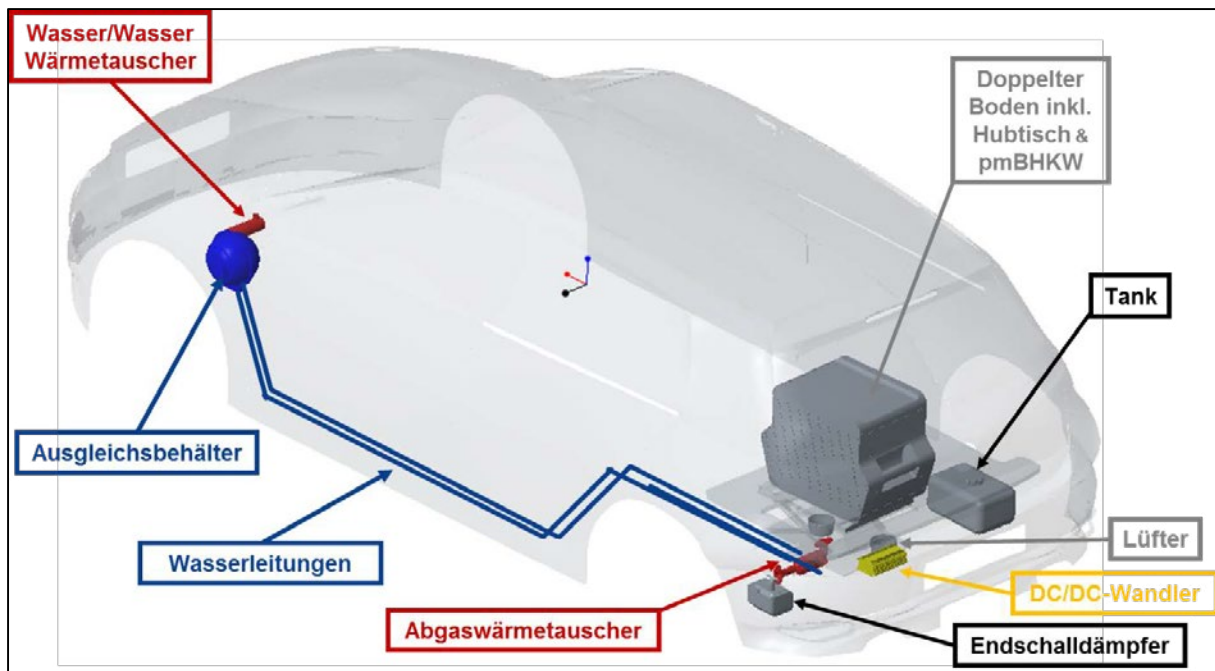


Abbildung 8: Implementierung des pmBHKW im Elektrofahrzeug,
Quelle für das VW-e-Golf-CAD-Modell: Bennani (2014)

Zur mobilen Nutzung in einem spezifischen Elektrofahrzeug gehören verschiedene vorbereitende Installationsarbeiten, wie bspw. Auslegung des Wärmekreislaufs, Verlegung von Leitungen, Vorsehen von Bohrungen und einer Aufnahmestation für das Aggregat im Kofferraum. In Abhängigkeit vom Fahrzeug ergeben sich unterschiedliche technische Aufwände, die aber in einer Wirtschaftlichkeitsrechnung für den angepeilten Markt für den Kunden akzeptabel erscheinen.

Fazit

Das pmBHKW versorgt in den Einsatzgebieten Gebäude und Elektrofahrzeug die Nutzer mit Wärme und elektrischem Strom. Diese Art von Doppelnutzung ist vor allem im Winter sehr effektiv, da ein hoher Anteil der erzeugten Energie genutzt wird. Der Vergleich mit dem Stand der Technik spiegelt die Vorteile des pmBHKWs insbesondere durch das geringe Gewicht wieder. Das äußere Design ist für das Aggregat von hoher Bedeutung, da der Anwender das pmBHKW manuell per Muskelkraft zwischen Gebäude und Elektrofahrzeug wechseln kann. Die Berücksichtigung von verschiedenen Aspekten, Forderungen und Wünschen ist genauso im Maschinenbau als auch im Design von größter Bedeutung, um eine kundengerechte und portable Anwendung zu gewährleisten.

Literaturverzeichnis

Bas, U. (2011): Entwicklung eines innovativen Range Extenders für Elektrofahrzeuge (Development of an innovative range extender for electric vehicles). Diplomarbeit. Aachen.

Bennani, M. (2014): Volkswagen Golf 7. Online verfügbar unter: <https://grabcad.com/library/volkswagen-golf-7-1>, zuletzt geprüft am 09.10.2018.

Blank, J. K. (2010): Konzeptentwicklung und Prototypkonstruktion einer Power Conditioning Unit zur Reichweiten- und Komforterrhöhung für Elektrofahrzeuge. Diplomarbeit, Ostfalia.

Broussely, M. et al. (2005): Main aging mechanisms in Li ion batteries. In: *Journal of Power Sources* 146 (1-2), S. 90–96. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2005.03.172.

Cordoba-Arenas, A. et al. (2015): Capacity and power fade cycle-life model for plug-in hybrid electric vehicle lithium-ion battery cells containing blended spinel and layered-oxide positive electrodes. In: *Journal of Power Sources* 278, S. 473–483. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2014.12.047.

Hanif, H. I. et al. (2017): Module design methodology for the conceptionalization of a portable unit for providing heat, cold and electricity in BEVs and buildings. 5th Annual International Conference on Industrial, Systems and Design Engineering, Athen, Griechenland.

Vetter, J. et al. (2005): Ageing mechanisms in lithium-ion batteries. In: *Journal of Power Sources* 147 (1–2), S. 269–281. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2005.01.006.



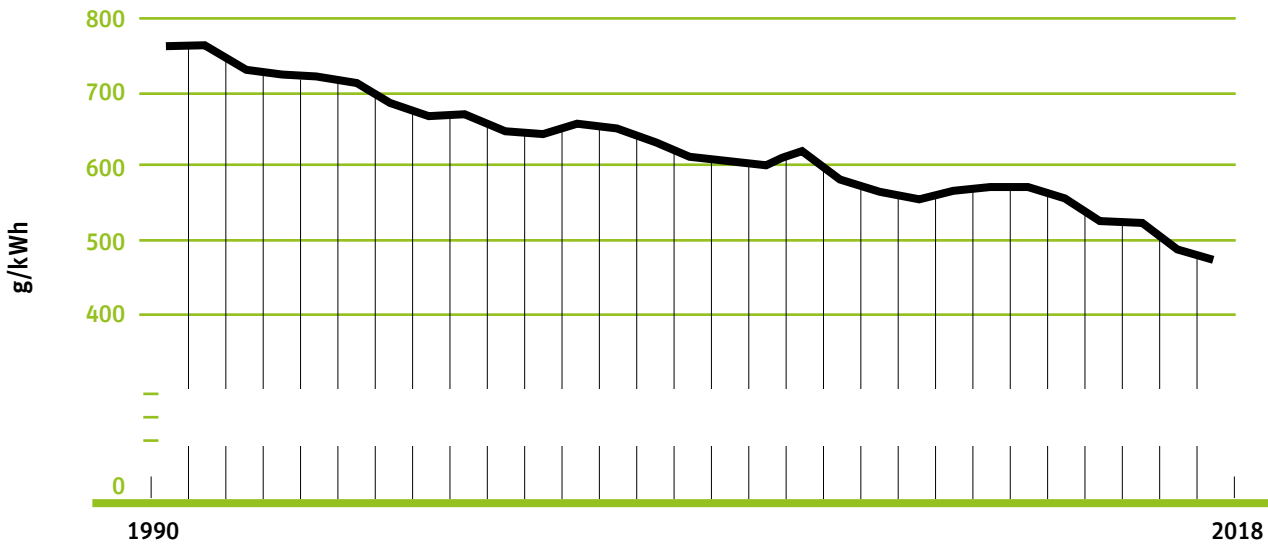
Diagramme & Fakten

Das Forschungscluster „Energie – Mobilität – Prozesse“ befasst sich mit komplexen und innovativen Zukunftsthemen der Energieversorgung von Morgen, der nachhaltigen Mobilität und Logistik sowie energieeffizienten verfahrenstechnischen Prozessen. Die Bedeutung dieser Themen nicht nur in unserem Wirtschaftssystem ist unumstritten.

Vielfältige Aspekte z. B. bei dem Bereich Energie wie **A**rten der Energie über Bereitstellung, Nutzung, bis hin zu dem **Z**entralen Thema „Klimaschutz“ sind im sozioökonomischen Entwicklungszusammenhang zu betrachten.

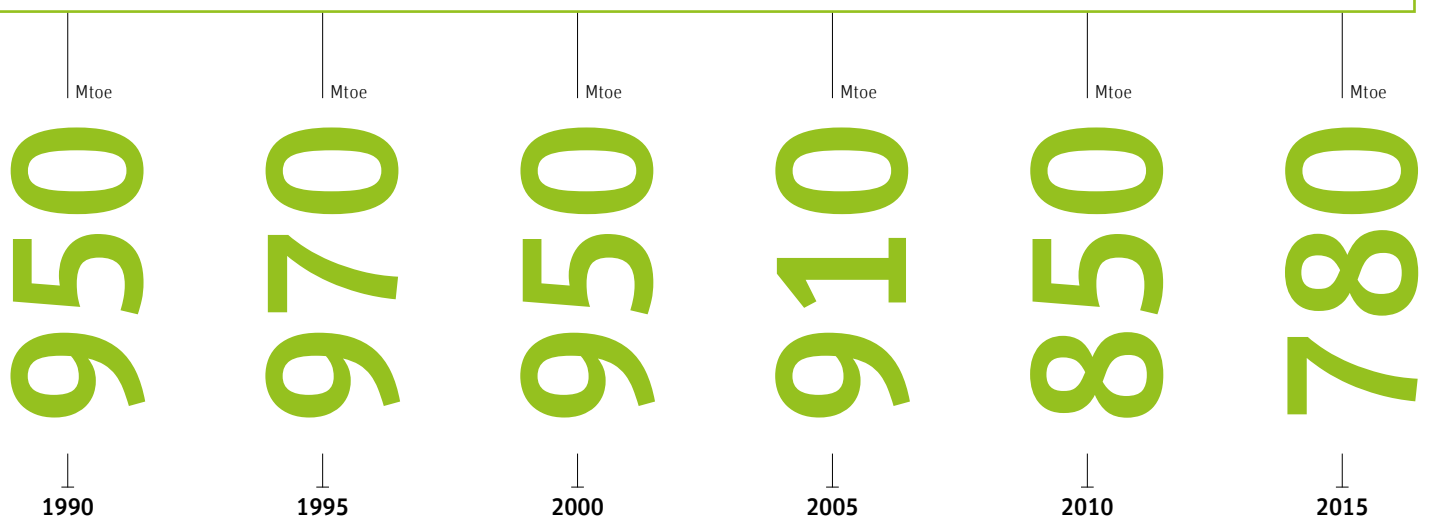
Die nachfolgenden Daten können demzufolge auch nur einen kleinen Ausschnitt über unsere Arbeitsbereiche im Forschungscluster EMP liefern und zeigen die Motivation für aktuelle und zukünftige Forschungsprojekte auf.

Entwicklung des CO₂-Emissionsfaktors für den Strommix in Deutschland (in Gramm pro Kilowattstunde)



Quelle: Umweltbundesamt Entwicklung der Spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2018 (Seite 9)

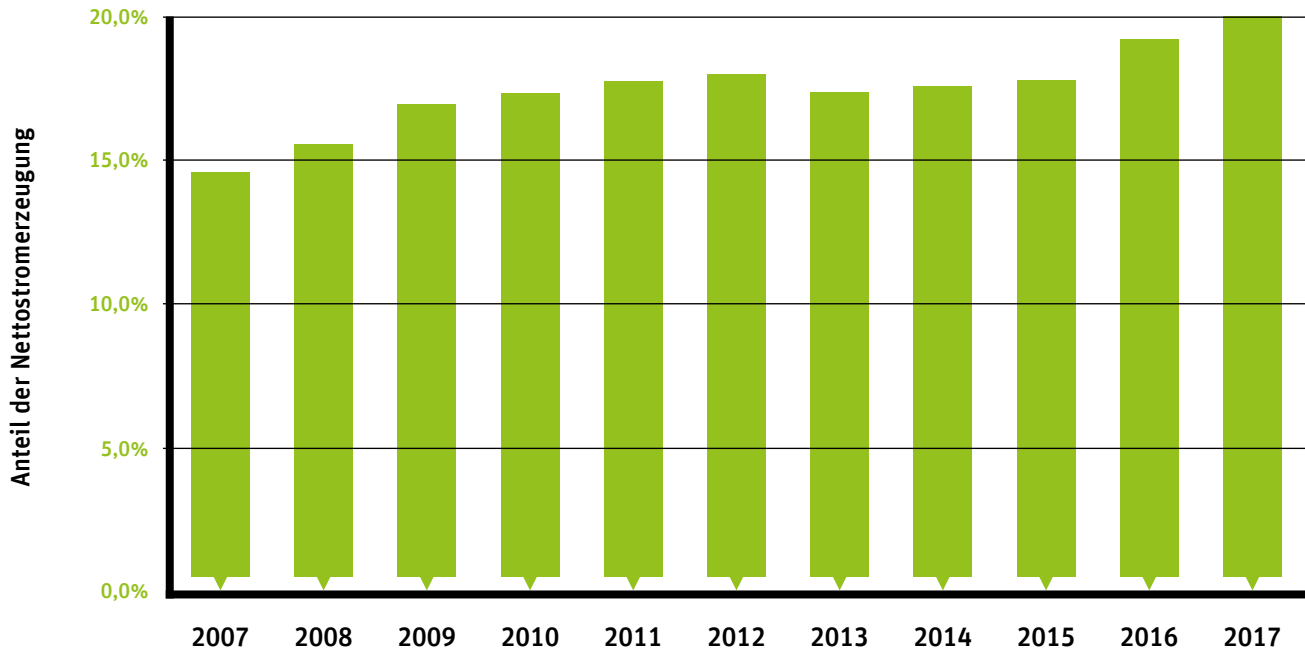
Nutzung nicht regenerativer Energien seit 1990 um 17 % zurückgegangen



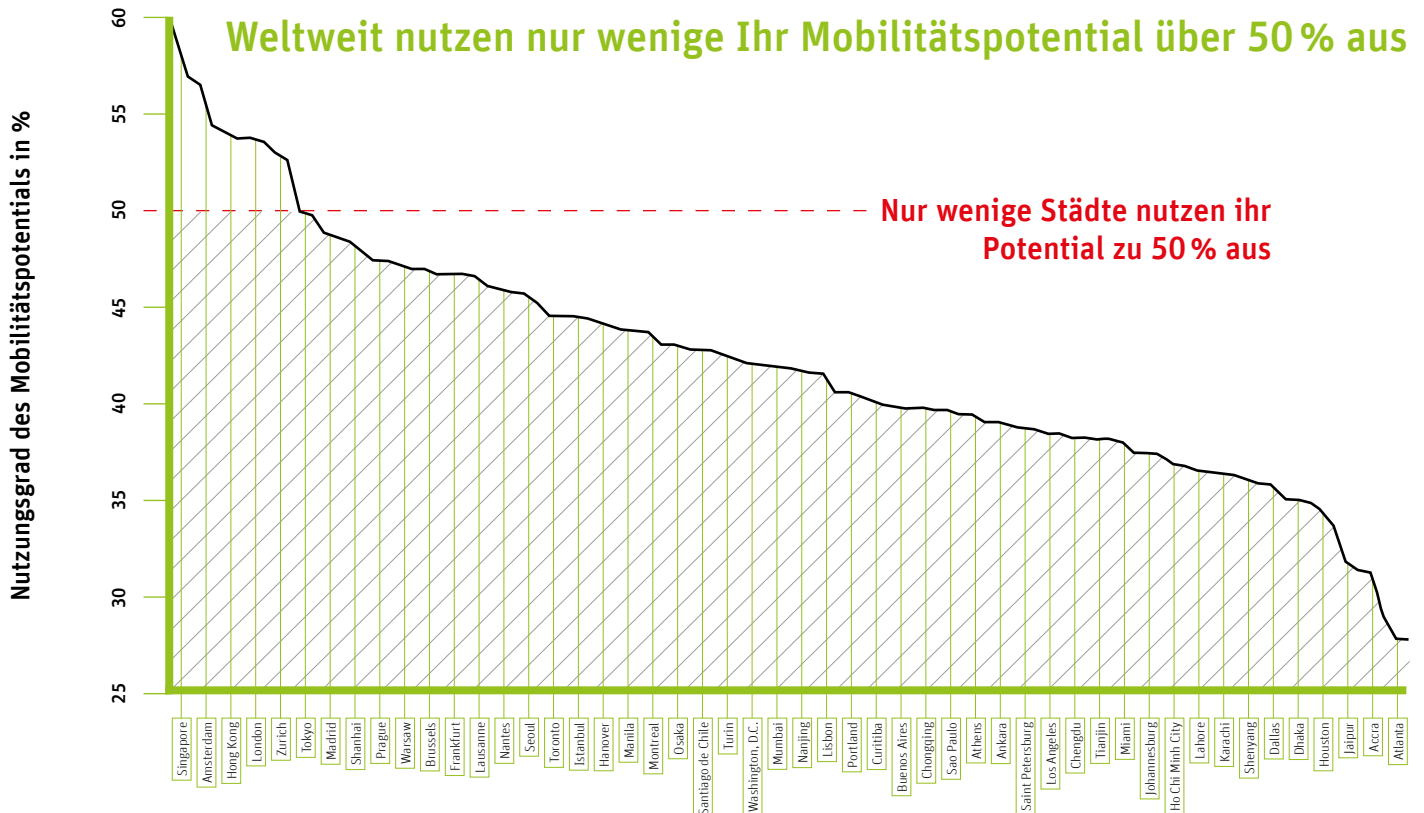
Quelle: European Transport ISBN 978-92-79-73952-1
<https://bit.ly/2y0mzwq>
Stand: 02.10.2018

Öläquivalent: 1 Mtoe = 11,63 TWh. 1SKE = 0,7 ÖE = 7.000 kcal = 29,3076 MJ = 8,141 kWh

Der Anteil der KWK-Stromerzeugung ist in den letzten 10 Jahren auf seinen aktuellen Höchststand von 20 % angestiegen



Quelle: AGEB; EEFA Auswertungstabellen zur Energiebilanz in Deutschland (Seite 13)
Stand: Juli 2018



Mobilitätspotential: Nutzung, Ausbau, Verbreitung aller Mobilitätssysteme, die in einer Stadt zum Einsatz kommen.

Quelle: <http://www.adlittle.com/futuremobilitylab/>
Stand: 2018

71 %

MIV-Wege (PKW als Fahrer, Mitfahrer, Krad)

20 %

ÖV-Wege
(Bus, Straba, U-/S-Bahn, Zug)

3 %

Sonstige (Schiff, Flugzeug usw.)

Übersicht der anteiligen Nutzung der Mobilitätsangebote in %

3 %

Fußwege

3 %

Fahrradwege

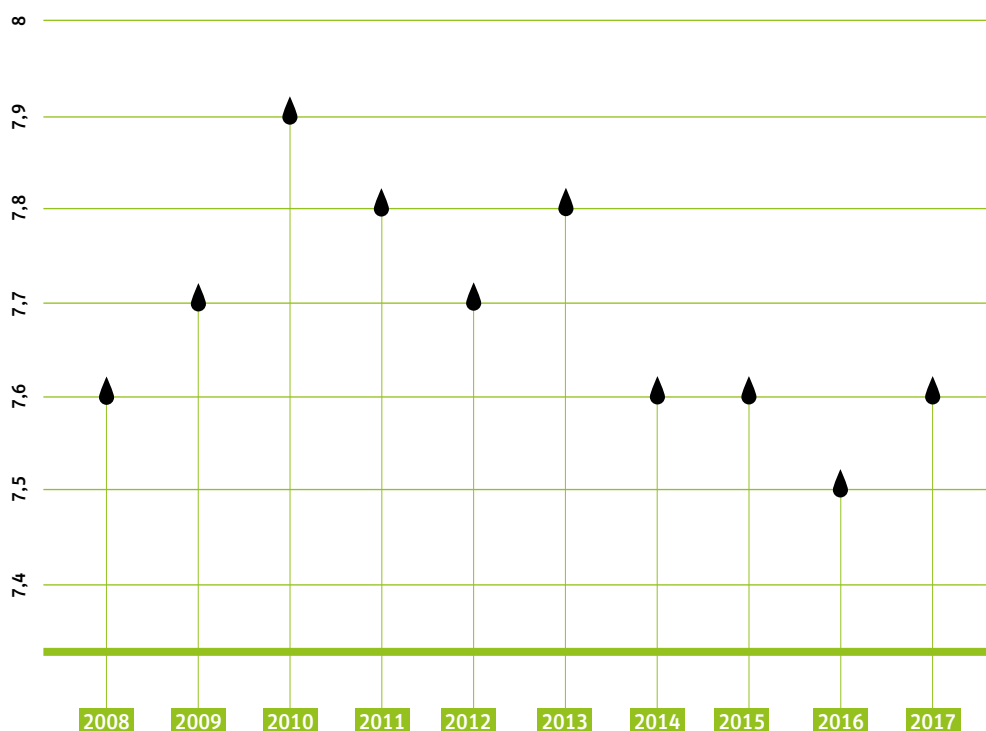
Quelle: Deutsches Mobilitätspanel
Stand: 2016/2017

Die durchschnittlichen

**V
er
brä
u
che**

der letzten
10 Jahre
waren annähernd
konstant

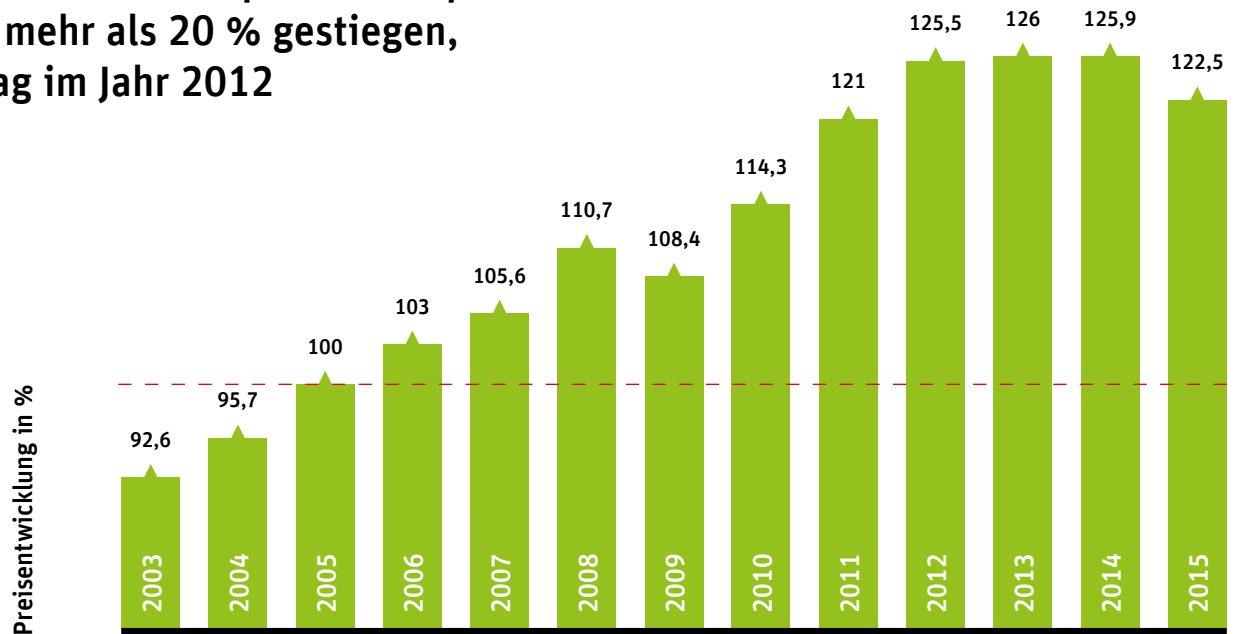
Verbrauch in l/100 km



Durch steigenden
Komfort haben sich
die Verbräuche
kaum geändert.

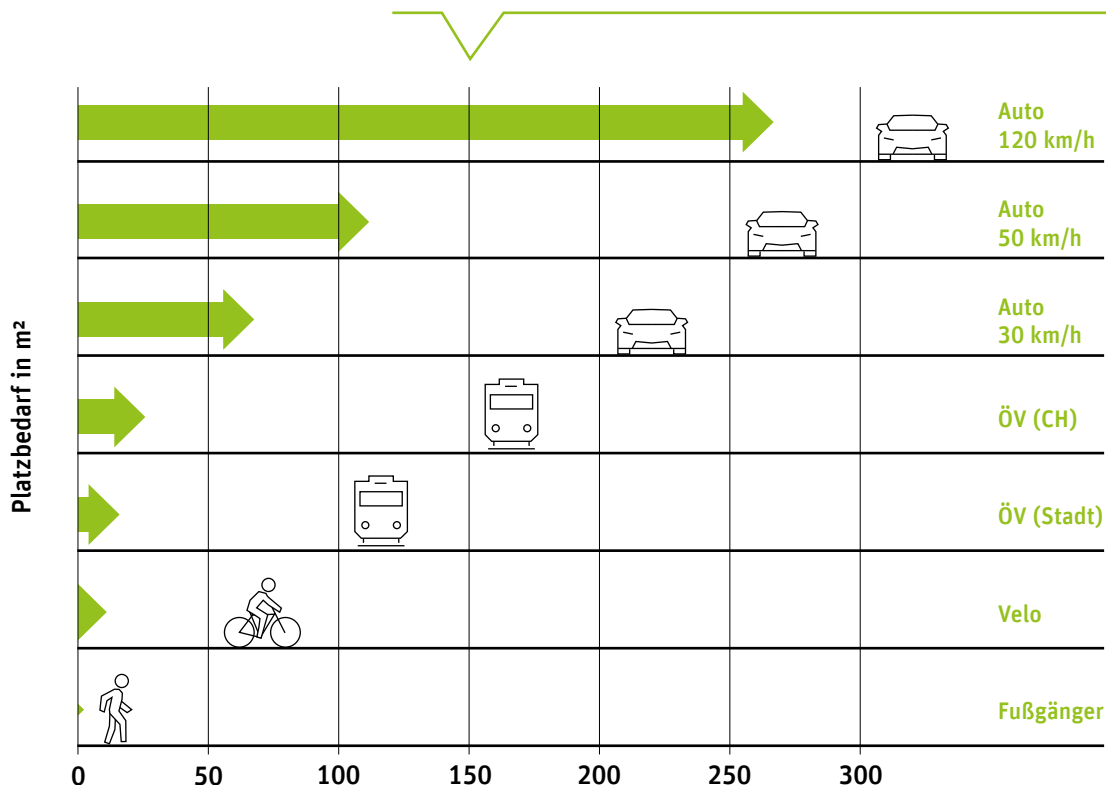
Quelle: Deutsches Mobilitätspanel
Stand: 2016/2017

Seit 2005 sind die Transportkosten pro Person um mehr als 20 % gestiegen, das Hoch lag im Jahr 2012



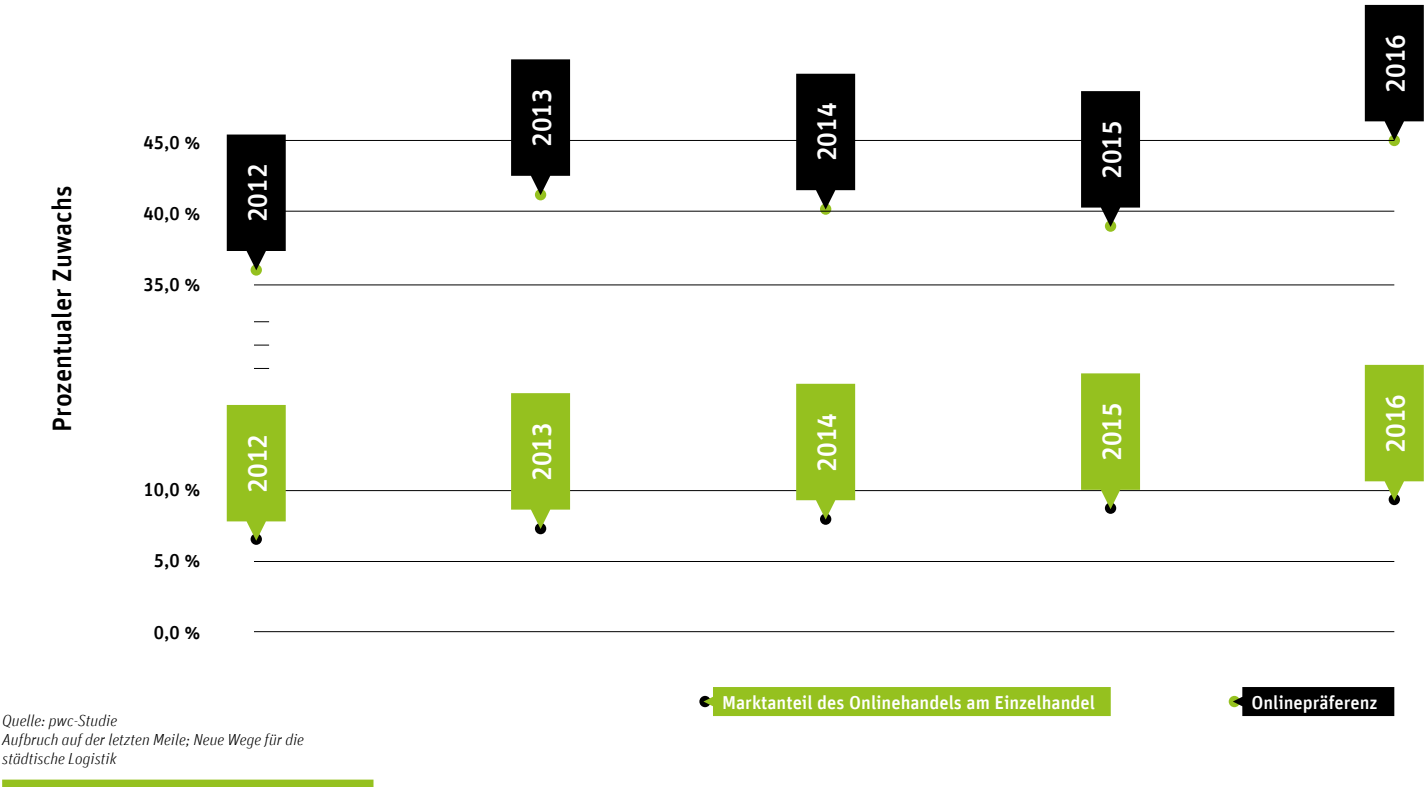
Quelle: European Transport ISBN 978-92-79-73952-1
<https://bit.ly/2y0mzwq>
 Stand: 02.10.2018

Ein PKW mit 120 km/h hat einen Raumbedarf von 267 m².
 Ein Fußgänger benötigt gerade einmal 1 m².



Quelle: Vortrag Anton Gunzinger 11. Juni 2015
 Wie viel Mobilität braucht der Mensch?
 Gedanken zu Energie, Raum und Zeit
 (Supercomputing System AG Technopark 1, 8005 Zürich)

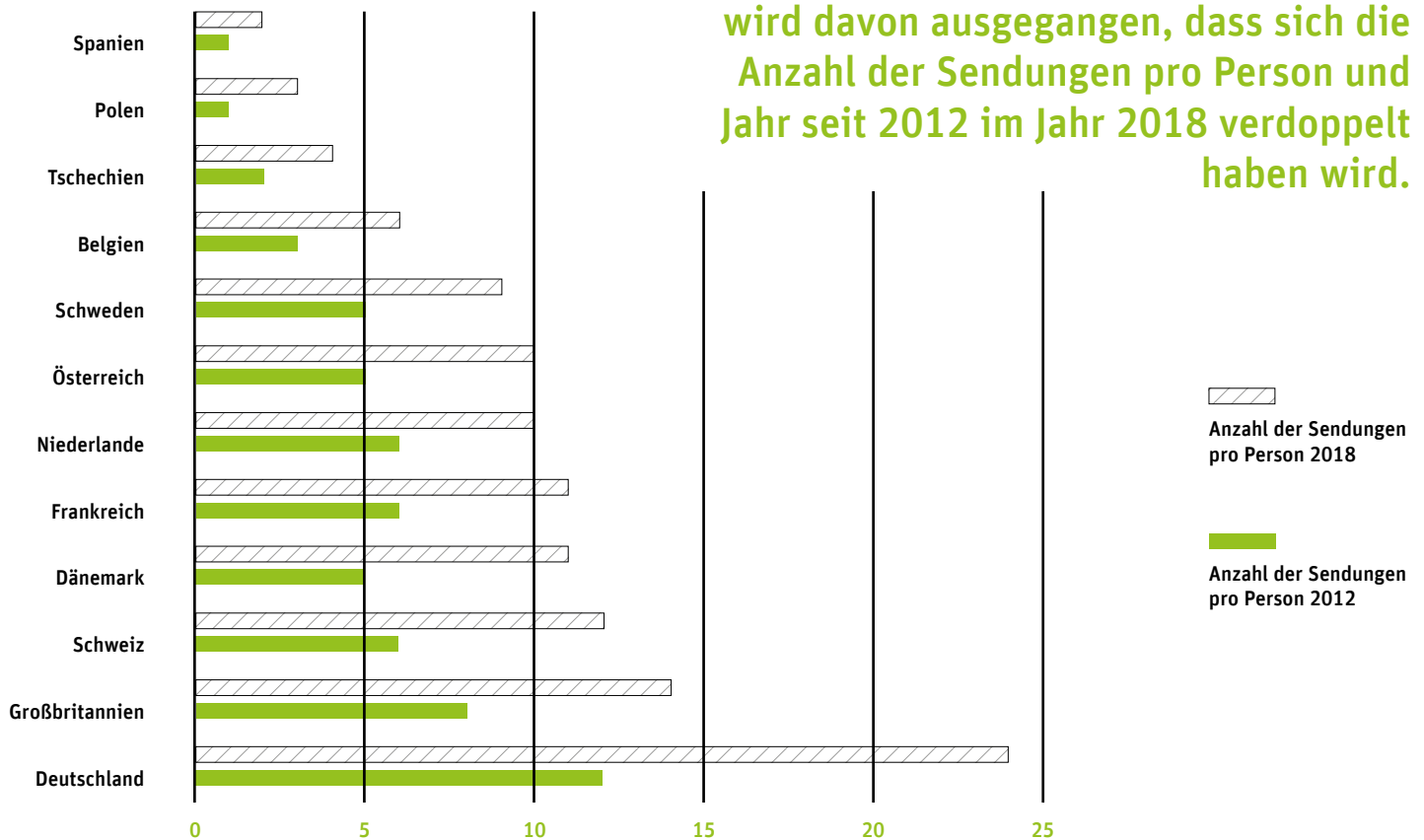
Der Onlineanteil am gesamten Einzelhandel hat sich in den vergangenen 10 Jahren auf 9,2 % vervierfacht.



Der durchschnittliche Erlös je Sendung ist in der Kurier, Express- und Paketbranche in dem Zeitraum 2000 bis 2017 auf dem Tiefststand.

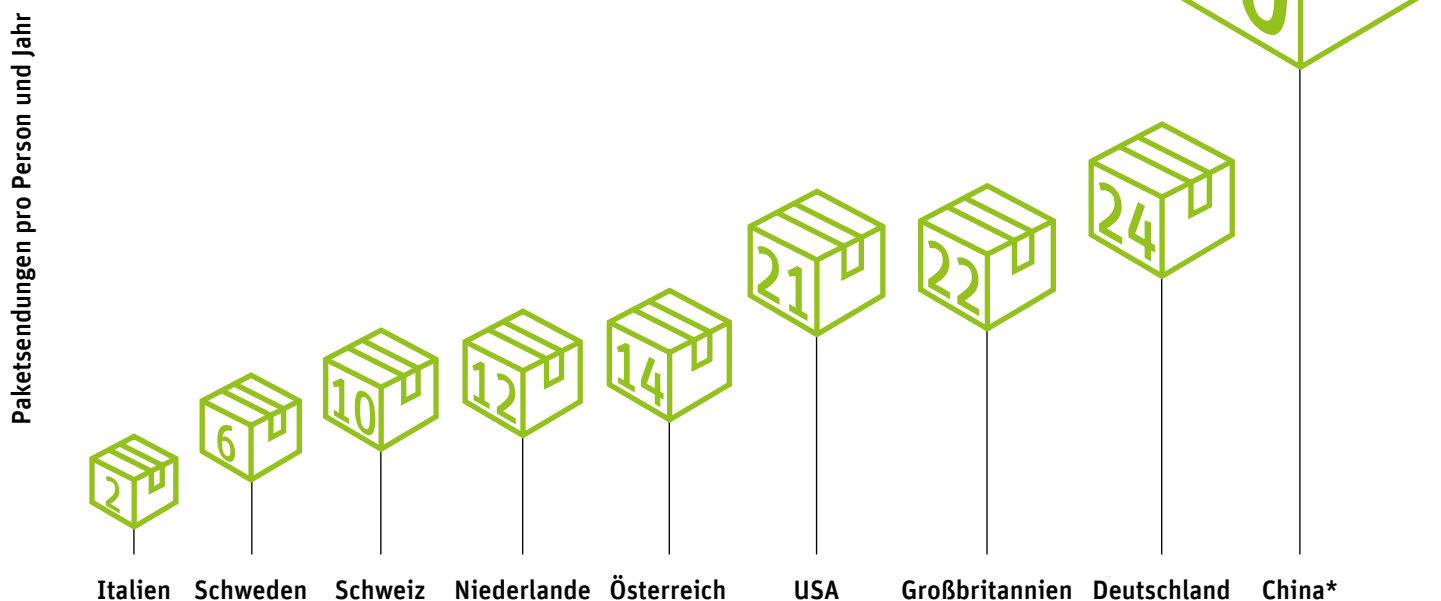


In den meisten europäischen Ländern wird davon ausgegangen, dass sich die Anzahl der Sendungen pro Person und Jahr seit 2012 im Jahr 2018 verdoppelt haben wird.



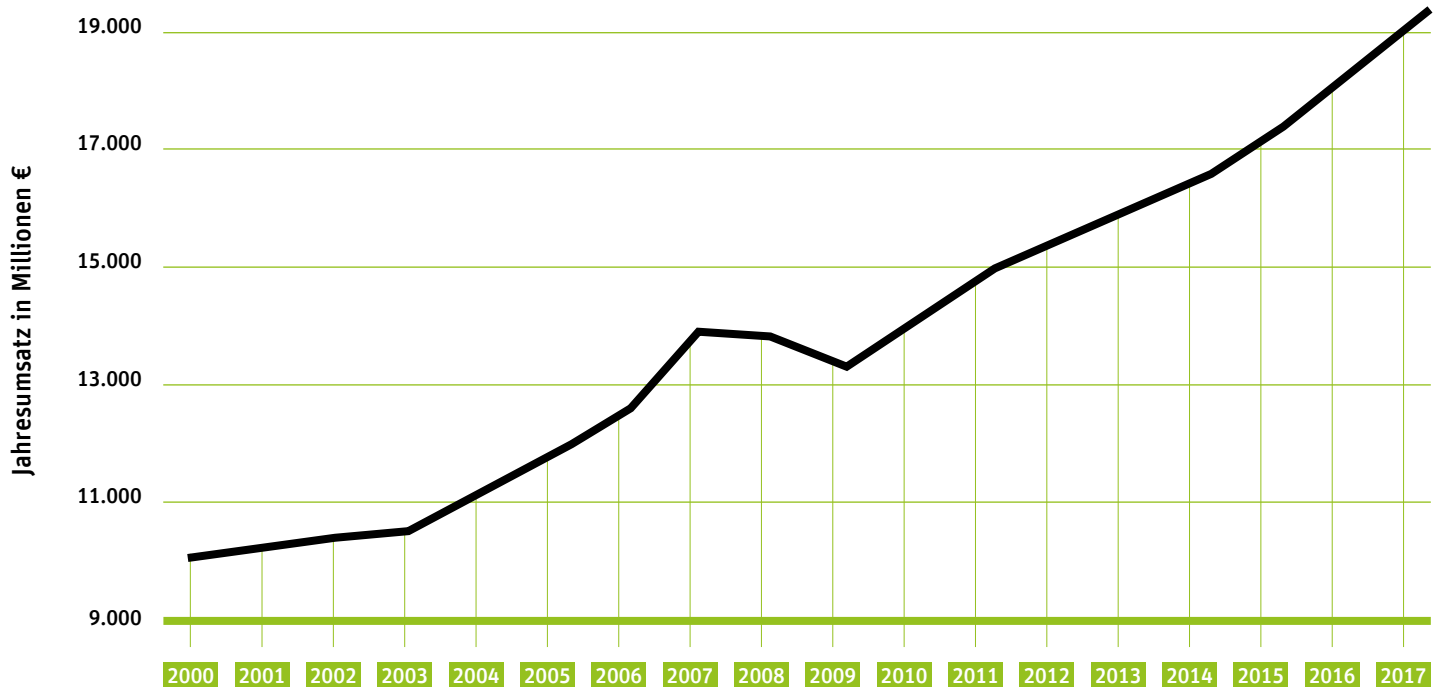
Quelle: Handelsblatt
Stand: Juni 2019

Die Städte Peking und Shanghai (China*) haben zusammen ein dreifach höheres Paketaufkommen gegenüber den USA und Deutschland.

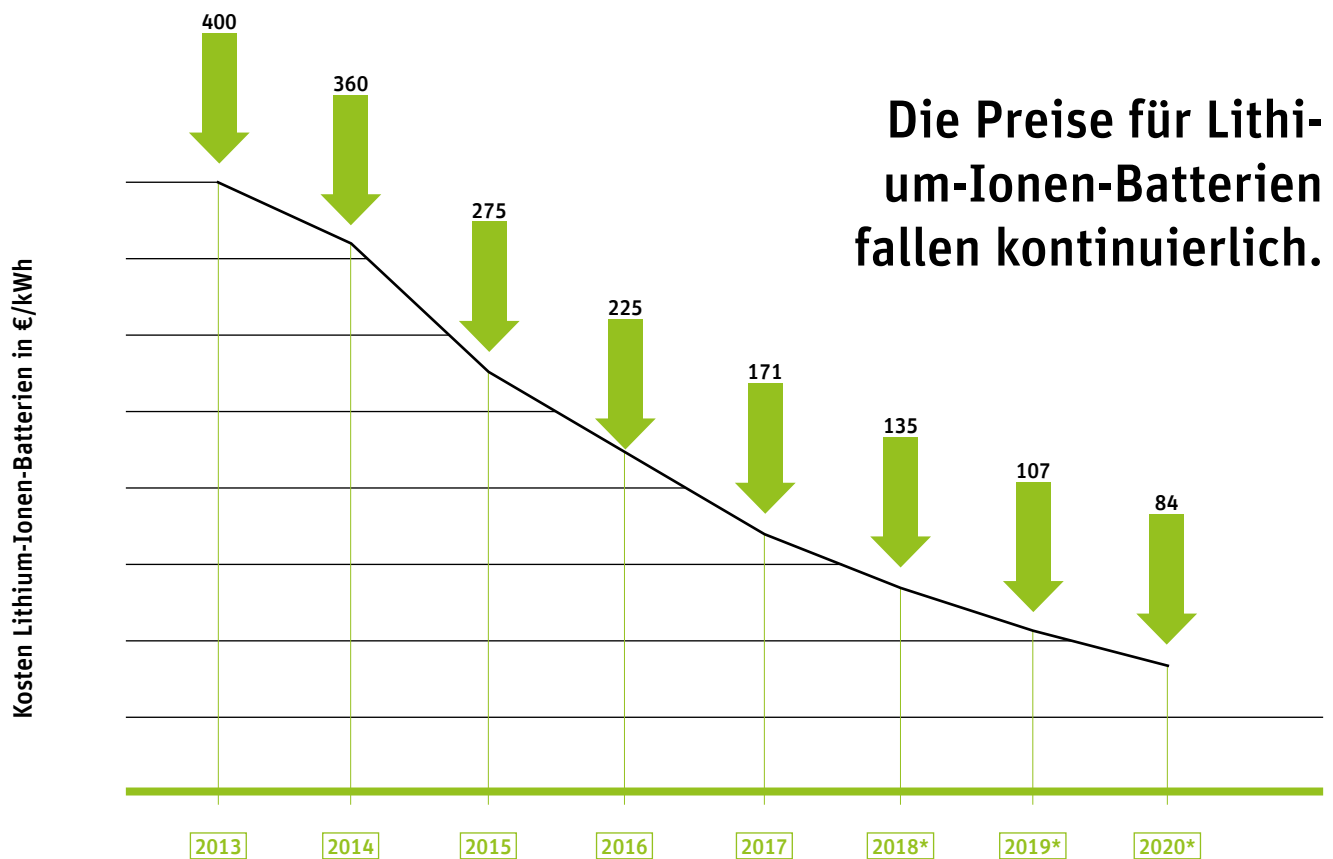


Quelle: Handelsblatt
Stand: Juni 2019

Der Umsatz im Bereich Kurier-, Express- und Paketdienste hat sich seit dem Jahr 2000 fast verdoppelt.



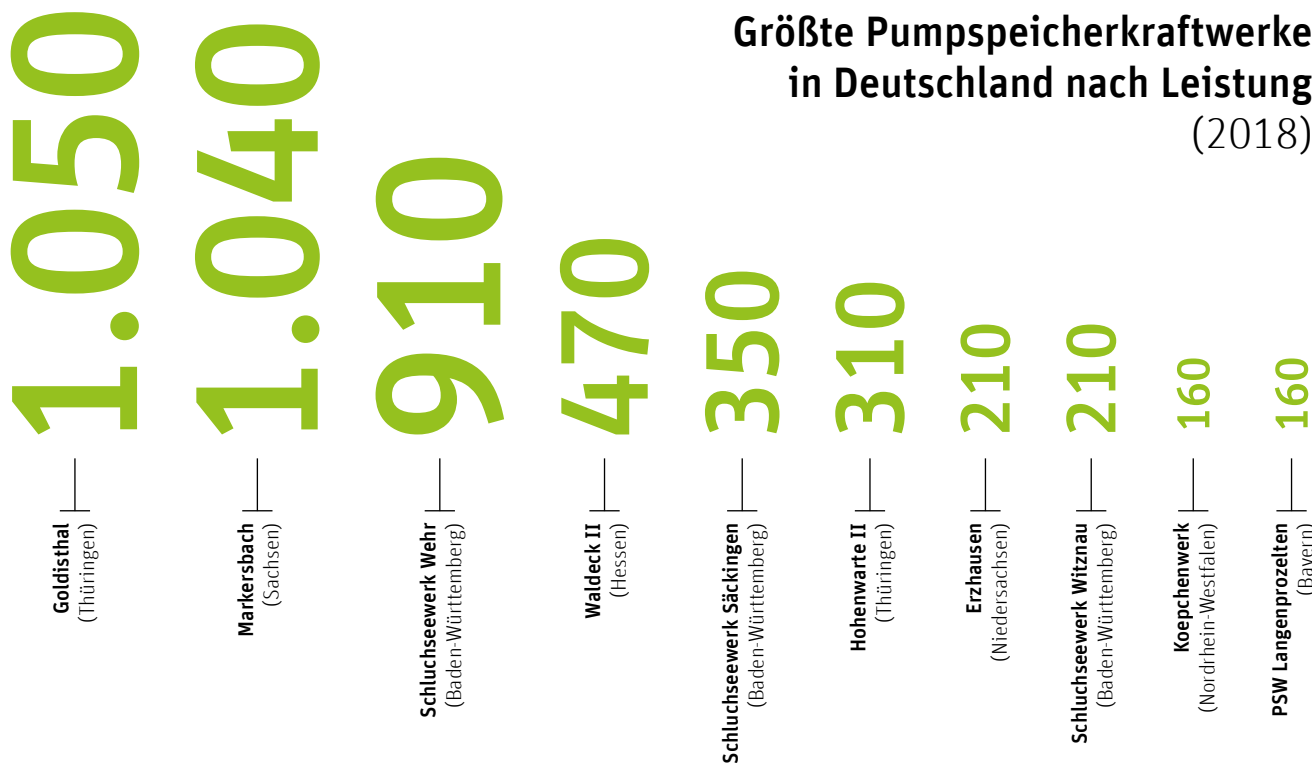
Quelle: KEP-Studie – Analyse des Marktes in Deutschland (Seite 17)
Stand: 2019



Quelle: Horváth & Partners
horvath-partners.com
Stand: Juli 2018

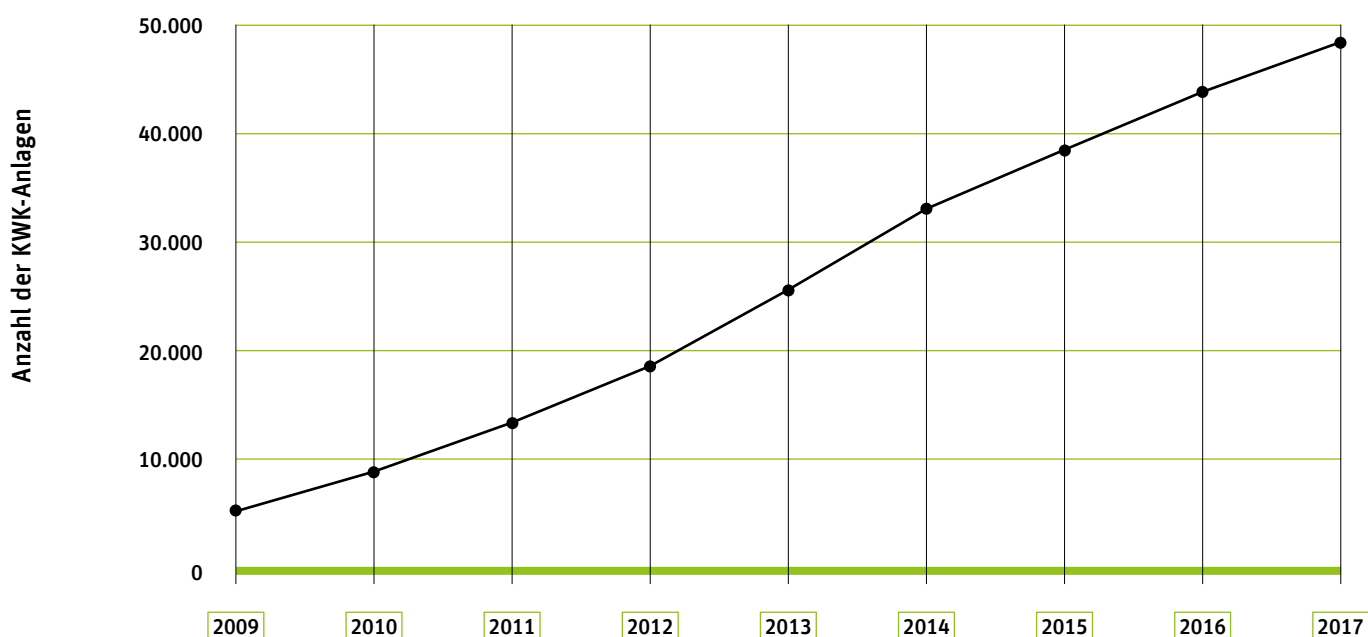
Nennleistung in Megawatt

Größte Pumpspeicherkraftwerke in Deutschland nach Leistung (2018)



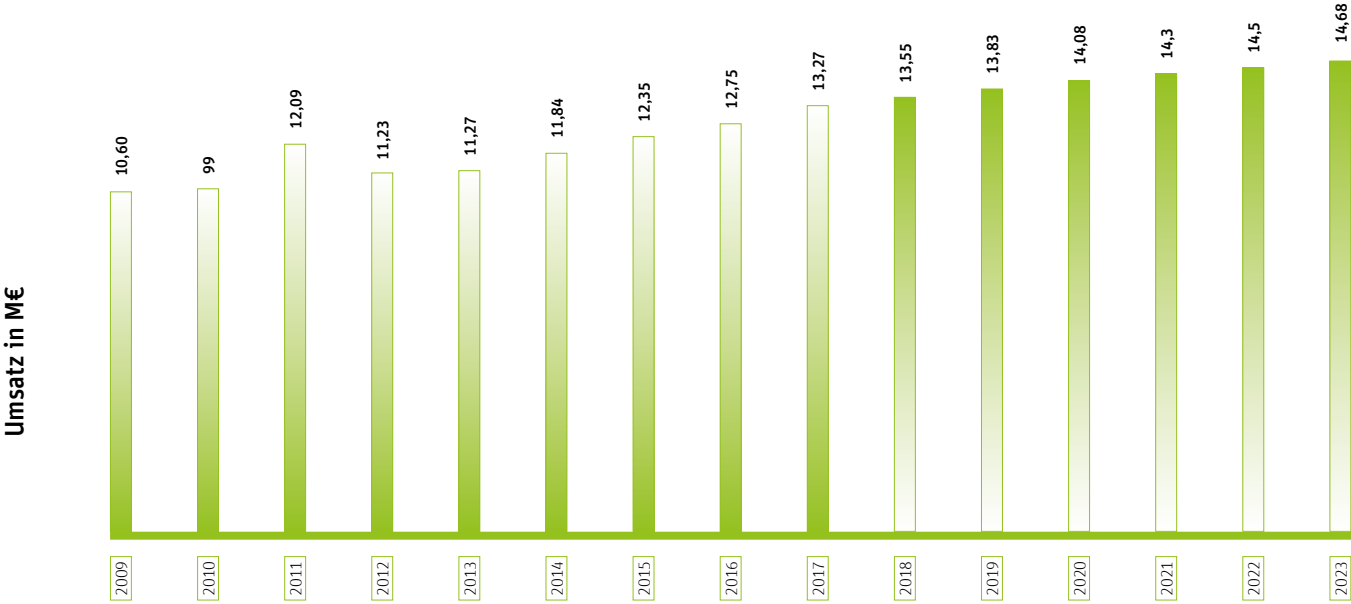
Quelle: Statista (Bundesnetzagentur)
Stand: Juli 2018

Der Bestand der Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen
ist in Deutschland kontinuierlich gestiegen.



Quelle: Statista
Stand: 2018

In der Herstellung von kälte- und lufttechnischen Erzeugnissen ist ein kontinuierlich wachsender Umsatz zu erkennen.



Quelle: Statistisches Bundesamt
Stand: 2009-2017

Unsere Autoren





Dennis Adamitz wurde 1983 in Paderborn geboren und studierte Elektrotechnik an der Hochschule Hannover, an der er 2016 den Master of Engineering abschloss. Derzeit arbeitet er als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Leibniz Universität Hannover.



Marvin Auf der Landwehr arbeitet als Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Hochschule Hannover und promoviert im Fachbereich Wirtschaftsinformatik an der Stiftungsuniversität Hildesheim. Zu seinen Forschungsschwerpunkten zählen neben Urbaner Logistik, Simulation in Produktion und Logistik, Geschäftsprozessmanagement und der Einsatz von Optimierungsverfahren für das Supply Chain Management auch die digitale Transformation im Dienstleistungssektor sowie die agile Innovationsentwicklung.



Alexander Bedrunka ist seit 2013 Promovend an der Hochschule Hannover. Im Bereich der Mikro-Elektromobilität fokussiert sich seine Forschungsarbeit auf Pedelecs und deren Einsatz in Vermiet-systemen. Von 2008 bis 2013 hat er dual

Produktionstechnik und Wertschöpfungsmanagement im Maschinenbau an der Hochschule Hannover in Kooperation mit verschiedenen Unternehmen studiert. Seit 2017 ist Alexander Bedrunka als Forschungskordinator im Forschungscluster Energie – Mobilität – Prozesse tätig.



Bin Cui arbeitet seit 2013 im Lehrgebiet der Numerische Strömungsmechanik an der Hochschule Hannover unter Leitung von Prof. Dr.-Ing. Martin Gottschlich. Er führt die zuständigen Laborveranstaltungen durch und ist, neben Lehraufträgen in der Mechanik und Rechneranwendungen, auch international in der Lehre tätig. Sein Forschungsgebiet umfasst die Entwicklung einer klimafreundlichen Kälteanlage auf Grundlage der Schukey-Technologie, zu welchem er auch seine Promotion bei Prof. Dr.-Ing. Stephan Kabelac an der Leibniz Universität Hannover anfertigt.



Jan Dünzte ist seit 2017 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IKME und derzeitiger Masterrand im allgemeinen Maschinenbau. Unter der Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. Lars-Oliver Gusig beschäftigt er sich mit der Urbanen Logistik. In dem interdisziplinären Team aus den Fachrichtungen Informatik, Wirtschaft und Ingenieurwesen sucht er für die Städte von Morgen nach nachhaltigen Logistiklösungen, die die lebenswertere Gestaltung von Städten und die ökonomischen Interessen von Unternehmen miteinander vereinbaren.



Timo Fünfkirchler war von 2017 bis 2019 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Konstruktionselemente Mechatronik und Elektromobilität (IKME) unter Leitung von Prof. Dr.-Ing. Lars-Oliver Gusig. Im Fachbereich „Urbane Logistik“ bearbeitete er das kooperative Forschungsprojekt „USEFUL (Untersuchungs-, Simulations- und Evaluationstool für Urbane Logistik)“. Zu seinen Projektschwerpunkten gehörten die Auswahl von Pilotquartieren, die Entwicklung von innovativen Logistikkonzepten sowie die Analyse des einwohnerspezifischen Mobilitätsverhaltens.



Lars-Oliver Gusig, Prof. Dr.-Ing. hat Maschinenbau an der Universität Hannover studiert und in Thermodynamik promoviert. Nach Industrietätigkeiten als Konstrukteur und Berater in internationalen Konzernen leitete er das Institut für Fahrzeugbau in Wolfsburg. Seit 2007 ist er an der Hochschule Hannover für die Bereiche Konstruktion und (Elektro-) Mobilität zuständig. Dort betreut er aktuell das „Institut für Konstruktionselemente, Mechatronik und Elektromobilität“ (IKME), ist Mitglied im Klimawesenrat der Region Hannover und in verschiedenen Forschungsprojekten aktiv.



Ulrich Lüdersen, Prof. Dr.-Ing. ist Professor an der Hochschule Hannover in der Fakultät II, Maschinenbau und Bioverfahrenstechnik. Er leitet das Institut für Verfahrenstechnik, Energietechnik und Klimaschutz (IVEK) und ist Sprecher des Forschungsclusters Energie-Mobilität-Prozesse (EMP) der Hochschule Hannover. Als promovierter Dipl.-Ing auf dem Gebiet der Thermodynamik lehrt er in den Bereichen mechanische Verfahrenstechnik, CAx-Apparate- und Anlagenbau und Simulation. Die Forschungsgebiete erstrecken sich von der Entwicklung und Optimierung verfahrenstechnischer und energietechnischer Prozesse bis zu climatechnischen Anwendungen sowie Oberflächen- und Strukturbehandlungen von Faserprodukten.



Anne Nadolny ist Professorin an der Hochschule Hannover in Fakultät II, Maschinenbau und Bioverfahrenstechnik. Als promovierte Naturwissenschaftlerin in Biochemie und Molekularbiologie und Dipl.-Ing (FH) Biotechnologie lehrt Sie u.a. Bioprozesstechnik und hygienegerechtes Gestalten von Apparaten und Anlagen. Schwerpunkte ihrer Forschungstätigkeiten im Institut für Verfahrenstechnik, Energietechnik und Klimaschutz (IVEK) sind hygienegerechte Gestaltung von (bio-) verfahrenstechnischen Anlagen und (umwelt-) analytische Prüfmethode.



Karl-Heinz Niemann, Prof. Dr.-Ing. vertritt seit 2005 die Lehrgebiete Prozessinformatik und Automatisierungstechnik an der Hochschule Hannover. Von 2002 bis 2005 war er an der Fachhochschule Nordostniedersachsen für das Lehrgebiet Prozessdatenverarbeitung verantwortlich. Davor war er in leitender Stellung in der Entwicklung von Prozessleitsystemen tätig, unter anderem bei ABB, Elsag Bailey und Hartmann & Braun. Zu seinen Forschungsgebieten gehören u. a. die Energieeffizienz und IT-Sicherheit von Produktionsanlagen.



Sergej Novikov stammt aus Miass, Russland und studierte Maschinenbau an der Hochschule Hannover, an der er 2014 den Master of Engineering abschloss. Seit 2013 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Hochschule Hannover im Bereich Mikroelektromobilität.

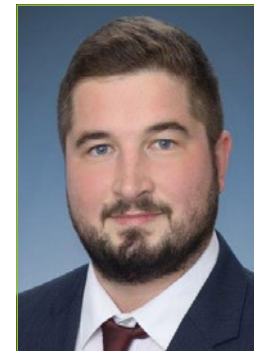


Maren Schmuck ist seit 2014 an der Hochschule Hannover beschäftigt. Sie führt Seminarveranstaltungen für die verfahrenstechnische Simulation, Auslegung und Planung im Studiengang Prozess

Engineering und Produktionsmanagement durch und ist, neben Lehraufträgen in der verfahrenstechnischen Planung, im Forschungsbereich Massenerhaltungssysteme für schriftliche Kulturgüter aktiv. Dort beschäftigt sie sich mit Methoden zur Erhaltung von Archivalien und Archivgut und der dazugehörigen Qualitätssicherung.



Christoph von Viebahn ist seit 2012 als Professor in der Fachrichtung Wirtschaftsinformatik an die Hochschule Hannover berufen (Studienschwerpunkt Supply Chain Management sowie die Grundlagen der BWL). 2016 wurde er zum Regionalgruppensprecher Niedersachsen der Bundesvereinigung Logistik (BVL) gewählt und ist seit 2017 Mitglied im Themenkreis Urbane Logistik der BVL. Seit 2017 ist er Teilprojektleiter des BMBF-Forschungsprojektes USEFUL zu Fragen der Urbanen Logistik.



Andreas Würger, M. Eng. ist seit 2017 wissenschaftlicher Mitarbeiter im Forschungsprojekt „Integriertes Anlagenengineering zur Erhöhung der Energieeffizienz IAE4“ an der Hochschule Hannover. Davor studierte er an der Hochschule Hannover Elektro- und Informationstechnik sowie den Masterstudiengang Sensor- und Automatisierungstechnik. Vor und während seines Studiums war er bei der MARS GmbH in Verden beschäftigt, unter anderem als Auszubildender zum Elektroniker für Automatisierungstechnik sowie als Werkstudent.



**HOCHSCHULE
HANNOVER**
UNIVERSITY OF
APPLIED SCIENCES
AND ARTS